



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

**Análisis y cuantificación de las variables
influyentes en la selección de un sistema óptimo
de distribución urbana de mercancías (DUM).**

Autor:

Alberto Torné Pellicer

Director:

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela:

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año:

2014

RESUMEN

El objetivo del presente TFM es el análisis y cuantificación de las variables más influyentes en la selección de un sistema óptimo de distribución urbana de mercancías. Los vehículos tradicionales utilizados para este propósito son fuente de emisiones contaminantes fruto de del funcionamiento de su propulsor térmico. Las condiciones de marcha de dichos vehículos exigen constantes arranques y paros, así como circulación a bajas velocidades que junto a una carga de masa elevada de mercancía a causa de su función suponen un consumo de combustible elevado junto a las emisiones contaminantes mencionadas. Todo ello se traduce en un problema tanto medioambiental como económico a causa del constante incremento en el precio del carburante.

Una alternativa frente a esta problemática, es el uso de vehículos eléctricos. Generalmente, la mayor parte existente de estos vehículos se caracterizan por su tamaño reducido y baja autonomía consecuencia de la poca masa de baterías que llevan, así como prestaciones muy inferiores a las de los vehículos tradicionales. En cambio, el vehículo que se presenta en este TFM se caracteriza por ser un vehículo de altas prestaciones y alta autonomía gracias a los más de 600 kg de módulos de batería que es capaz de almacenar en su estructura. Nacido a partir de un vehículo todoterreno tradicional de combustión interna, ha sufrido un proceso de electrificación hasta convertirse en un vehículo completamente eléctrico.

Para determinar la viabilidad del nuevo vehículo transformado en la tarea de distribución urbana de mercancías, es necesario cuantificar la influencia de variables como el desnivel de la zona de actuación, la cantidad de masa de batería cargada o el mapa-motor de funcionamiento en cada configuración.

Para ello, en primer lugar se describirá el proceso de selección de componentes (vehículo original, motor eléctrico, baterías, etc) que se llevaron a cabo antes de la transformación del vehículo. A continuación, se procederá al modelado y simulación del vehículo mediante la herramienta informática Adams/Car de acuerdo a los parámetros que rigen los distintos subsistemas que componen el ensamblaje final del modelo de simulación. Una vez modelado el vehículo, se definirán tres configuraciones de masa de baterías cargadas-mapa motor, se establecerá un ciclo de conducción y se modelarán dos trazados, uno llano y el segundo con diferentes desniveles. Finalmente, se realizará al análisis de la influencia de cada una de las variables de estudio en los resultados obtenidos de la simulación.

Índice de contenidos

Capítulo	Página
1. Introducción.	16
1.1 Contexto del Trabajo Fin de Máster.	16
1.2 Objetivo y alcance.	18
1.3 Introducción a los vehículos eléctricos.	18
1.4 Estructura de la memoria.	19
2. Descripción del vehículo Zytel Zero.	20
2.1 Selección del vehículo original.	20
2.2 Selección del motor eléctrico y el controlador.	23
2.3 Selección y disposición de las baterías.	28
2.4 Selección de elementos auxiliares.	33
2.5 Proceso de electrificación.	38
3. Modelado de la arquitectura del Zytel Zero.	46
3.1 Herramienta de simulación Adams/Car.	46
3.2 Situación inicial.	47
3.3 Modelado de los subsistemas.	49
4. Modelado del trayecto en Adams/Car.	62
4.1 Modelización por puntos.	63
4.2 Modelización por tramos.	64
5. Simulación del vehículo mediante Adams/Car.	66
5.1 Configuraciones peso-motor del vehículo.	66
5.2 Elección del ciclo de conducción y configuración del trazado	73
5.3 Casos de simulación.	78

ÍNDICE DE CONTENIDOS

6. Análisis de los resultados de la simulación.	80
6.1 Influencia de la configuración peso-motor para un mismo trazado.	81
6.2 Influencia del trazado para misma configuración peso-motor.	99
7. Conclusiones finales y posibilidades de continuación.	115
7.1 Conclusiones finales del análisis de simulación.	115
7.2 Posibilidades de continuación del proyecto.	117
8. Bibliografía.	118

Índice de tablas

Título	Página
Tabla 1. Posibles vehículos a elegir.	21
Tabla 2. Vehículo seleccionado.	22
Tabla 3. Posibles motores a seleccionar.	24
Tabla 4. Características del motor UQM.	25
Tabla 5. Características técnicas del controlador.	26
Tabla 6. Rango de corrientes y tensiones.	26
Tabla 7. Baterías candidatas a ser seleccionadas.	29
Tabla 8. Batería seleccionada.	29
Tabla 9. Parámetros del subsistema ruedas.	50
Tabla 10. Parámetros del subsistema de frenos.	51
Tabla 11. Parámetros del subsistema de suspensión delantera.	52
Tabla 12. Parámetros del subsistema de suspensión trasera.	54
Tabla 13. Parámetros del subsistema de la dirección.	55
Tabla 14. Parámetros del subsistema del motor eléctrico.	58
Tabla 15. Parámetros del subsistema del chasis.	60
Tabla 16. Configuración A de peso-motor.	67
Tabla 17. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración A.	68
Tabla 18. Configuración B de peso-motor.	69
Tabla 19. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración B.	69
Tabla 20. Configuración C de peso-motor.	71
Tabla 21. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración C.	72
Tabla 22. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado llano 1/2.	91
Tabla 23. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado llano 2/2.	91
Tabla 24. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado con pendiente.	98
Tabla 25. Incrementos de potencia en la configuración A en zonas de trazado con desnivel.	104
Tabla 26. Incrementos de potencia en la configuración B en zonas de trazado con desnivel.	109
Tabla 27. Incrementos de potencia en la configuración C en zonas de trazado con desnivel.	114

Índice de figuras

Título	Página
Figura 1. Transformación vehículo original en Zytel Zero.	20
Figura 2. Suzuki Jimny.	22
Figura 3. Tipos de motores eléctricos.	23
Figura 4. Motor UQM.	24
Figura 5. Diagrama Potencia (Kw) – Velocidad (rpm/100).	25
Figura 6. Conexiones de cableado.	27
Figura 7. Software de control.	27
Figura 8. Configuración de parámetros mediante el software.	28
Figura 9. Batería SE180AHA del fabricante Sky Energy.	30
Figura 10. Cajón trasero de baterías.	30
Figura 11. Faldón trasero de baterías.	31
Figura 12. Faldón lateral derecho.	31
Figura 13. Medición de la Resistencia Interna de la batería	31
Figura 14. Curva de Descarga de la batería.	32
Figura 15. Equilibrado de las baterías.	32
Figura 16. Sistema de refrigeración.	33
Figura 17. Conexión del sensor y válvula amal.	34
Figura 18. Alternador.	35
Figura 19. Arranque suave o Softstart.	36
Figura 20. Battery Management System.	37
Figura 21. Equipo BMS.	37
Figura 22. Diagrama de proceso de electrificación.	38
Figura 23. Desmontaje de elementos MACI.	38
Figura 24. Sustitución de ejes.	39
Figura 25. Montaje de nuevos componentes.	40
Figura 26. Modificaciones en carrocería.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 27. Cajón ubicado en la parte trasera del habitáculo	41
Figura 28. Cajones laterales.	41
Figura 29. Cajón atornillado al bastidor.	42
Figura 30. Cadena de tracción eléctrica.	42
Figura 31. Acoplamiento entre caja de transferencia y motor.	42
Figura 32. Accionamiento freno de estacionamiento.	43
Figura 33. Montaje de baterías en el cajón trasero.	43
Figura 34. Montaje de baterías en el faldón trasero.	44
Figura 35. Conexión de baterías del faldón trasero.	44
Figura 36. Conexión de baterías del cajón trasero.	44
Figura 37. Modelado del Zytel Zero.	47
Figura 38. Modelado de las ruedas.	49
Figura 39. Modelado de los frenos.	50
Figura 40. Modelado de la suspensión delantera.	52
Figura 41. Modelado de la suspensión trasera.	53
Figura 42. Modelado de la dirección.	55
Figura 43. Motor DC Brushless montado en el Zytel Zero.	56
Figura 44. Motor de combustión interna de la biblioteca de Adams/Car	56
Figura 45. Modelado del motor eléctrico.	57
Figura 46. Curva Par motor(N·mm) – Velocidad de giro (rpm).	59
Figura 47. Curva de Potencia (CV) - Velocidad de giro (rpm).	59
Figura 48. Modelado del chasis.	60
Figura 49. Circuitos cerrados en Adams/Car.	62
Figura 50. Trayecto abierto en Adams/Car.	62
Figura 51. Ventana de trabajo de Road Builder.	63
Figura 52. Pestaña Road Points de Road Builder.	64
Figura 53. Pestaña Road Generator de Road Builder.	65
Figura 54. Problemática entre masa de batería y autonomía en vehículos eléctricos.	66
Figura 55. Curva par motor (N·mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración A.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 56. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración A.	68
Figura 57. Curva par motor (N·mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración B.	70
Figura 58. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración B.	70
Figura 59. Curva par motor (N·mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración C.	72
Figura 60. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración C.	72
Figura 61. Representación velocidad (km/h) – tiempo (s) en ciclo NEDC.	73
Figura 62. Representación velocidad (km/h) – tiempo (s) en del nuevo ciclo de simulación.	74
Figura 63. Configuración del archivo DCD para la simulación.	75
Figura 64. Trazado en forma de recta empleado en la simulación.	75
Figura 65. Modelización del trazado recto llano mediante “Road Builder”	76
Figura 66. Altura recorrida (m) a lo largo del trazado.	76
Figura 67. Modelización del trazado recto con pendiente mediante “Road Builder”	77
Figura 68. Verificación de la modelización del trazado con pendiente.	77
Figura 69. Configuración de la simulación en Adams/Car.	78
Figura 70. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano.	81
Figura 71. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.	82
Figura 72. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano en zona extra- urbana.	82
Figura 73. Detalle de la zona de máxima velocidad	82
Figura 74. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano.	83
Figura 75. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.	83
Figura 76. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.	84
Figura 77. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 78. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.	85
Figura 79. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.	86
Figura 80. Energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado llano.	87
Figura 81. Detalle de la energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.	87
Figura 82. Par motor (N·mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano.	88
Figura 83. Par motor (N·mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.	88
Figura 84. Par motor (N·mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.	89
Figura 85. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano.	89
Figura 86. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.	90
Figura 87. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.	90
Figura 88. Zonas de estudio de máxima potencia en el ciclo de conducción para el trazado llano.	91
Figura 89. Perfil de alturas correspondiente al trazado con desnivel.	92
Figura 90. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado con pendiente en zona urbana.	92
Figura 91. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.	93
Figura 92. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.	94
Figura 93. Energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado con pendiente.	95
Figura 94. Detalle de la energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 95. Par motor (N·mm) suministrado para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.	96
Figura 96. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado con pendiente en zona urbana.	97
Figura 97. Zonas de estudio de máxima potencia en el ciclo de conducción para el trazado con pendiente.	98
Figura 98. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.	99
Figura 99. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.	100
Figura 100. % de acelerador pisado para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.	100
Figura 101. Energía consumida (kJ) por la configuración A en los dos trazados en el ciclo de conducción.	101
Figura 102. Energía consumida (kJ) por la configuración A en los dos trazados en la zona urbana.	101
Figura 103. Par motor (N·mm) suministrado para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.	102
Figura 104. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.	103
Figura 105. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración A.	103
Figura 106. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.	104
Figura 107. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.	105
Figura 108. % de acelerador pisado para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.	105
Figura 109. Energía consumida (kJ) por la configuración B en los dos trazados en el ciclo de conducción.	106
Figura 110. Energía consumida (kJ) por la configuración B en los dos trazados en la zona urbana.	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 111. Par motor (N·mm) suministrado para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.	107
Figura 112. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.	108
Figura 113. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración B.	108
Figura 114. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.	109
Figura 115. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.	110
Figura 116. % de acelerador pisado para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.	110
Figura 117. Energía consumida (kJ) por la configuración C en los dos trazados en el ciclo de conducción.	111
Figura 114. Energía consumida (kJ) por la configuración C en los dos trazados en la zona urbana.	112
Figura 119. Par motor (N·mm) suministrado para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.	112
Figura 120. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.	113
Figura 121. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración C.	114

Glosario de abreviaturas

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
AC	Alternating Current (Corriente Alterna)
BLDC	Brushless Direct Current Motor (Motor Brushless de Corriente Continua)
CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Ingeniería Asistida por Computador)
DC	Direct Current (Corriente Continua)
DCD	Driver Control Data (Datos de Control del Conductor)
DUM	Distribución urbana de mercancías
EMS	Sistema de Regulación Electrónica de la Potencia Motor
EUDC	Extra-Urban driving cycle
EV	Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico)
GITEL	Grupo de Investigación en Transporte y Logística
I+D+i	Investigación, Desarrollo e Innovación
IGES	Initial Graphics Exchange Specification (Especificación para Intercambio Inicial de Gráficos)
MACI	Motor de Combustión Interna
NEDC	New European Driving Cycle
RPM	Revoluciones por Minuto
SL	Sociedad Limitada
TFM	Trabajo Final de Máster
VCI	Vehículo de Combustión Interna
VE	Vehículo Eléctrico

MEMORIA

1. Introducción.

1.1 Contexto del Trabajo Fin de Máster.

El presente Trabajo Fin de Máster nace dentro del proyecto Zytel Zero. Este proyecto fruto de la colaboración entre la empresa Zytel Automoción S.L. y del Grupo en Investigación en Transporte y Logística (GITEL) tiene como objetivo la transformación de un vehículo tradicional propulsado por un motor de combustión interna en un vehículo eléctrico de altas prestaciones y gran autonomía para su uso en distribución urbana de mercancías (DUM).

La puesta en marcha y desarrollo del proyecto ha contado con la dedicación de diferentes estudiantes que han trabajado en diversas áreas asociadas a la transformación y puesta en marcha del vehículo Zytel Zero siendo el presente TFM una de dichas áreas de desarrollo.

De manera breve y concisa, podrían enumerarse los trabajos realizados de la siguiente manera:

❖ Transformación de la arquitectura del vehículo original:

Esta área se encargó de la selección del vehículo original así como de los nuevos componentes (motor eléctrico, baterías, elementos auxiliares, etc). Además, definió la nueva arquitectura del vehículo y modificó en consecuencia, sistemas como ejes, suspensiones o neumáticos de acuerdo a la nueva propuesta. Finalmente, llevó a cabo la transformación del vehículo de acuerdo a una secuencia planificada de etapas.

❖ Puesta a punto del sistema de tracción:

El nuevo sistema de tracción eléctrico necesita la correcta configuración de todos los elementos que lo integran para conseguir un funcionamiento eficiente. Para ello, debe instalarse el controlador que se encarga del correcto funcionamiento del motor eléctrico en las condiciones de carga deseadas (par, velocidad, tensión) así como de informar al usuario de las condiciones de temperatura y carga en cada momento. Además, el Battery Management System (BMS) que se encarga de la lectura de las variables de funcionamiento del conjunto de baterías (nivel de carga y temperatura) debe ser configurado correctamente.

1. INTRODUCCIÓN

❖ Diseño del sistema de refrigeración de los cofres de baterías:

Debido a la alta intensidad de corriente que circula por el conjunto de baterías, la temperatura de los cofres alcanza valores muy por encima de los considerados admisibles a partir de la información suministrada por el fabricante. En consecuencia, es necesaria la instalación de un sistema de refrigeración en los cofres basado en ventiladores accionados mediante corriente eléctrica.

❖ Elaboración de un protocolo de seguridad:

Las condiciones de funcionamiento del vehículo tras su transformación suponen la existencia de un alto voltaje y una alta intensidad de corriente dado el alto número de módulos de batería. Todo ello deriva en la necesidad de establecer un protocolo de seguridad a la hora del manejo de los distintos sistemas eléctricos existentes en el vehículo. Debe concretar desde los pasos a seguir en cualquier procedimiento de intervención en un determinado sistema del vehículo hasta el equipamiento de protección que debe emplear el personal en dicha intervención.

❖ Modelado y simulación del comportamiento del vehículo:

Por último, esta área de trabajo que conforma la base del presente TFM tiene como labor el modelado y simulación del comportamiento del vehículo mediante el software Adams/Car. El objetivo principal es desarrollar un modelo de simulación con un alto grado de fidelidad al vehículo real que permita realizar recorridos virtuales por trazados reales o ficticios con unas características determinadas (longitud, pendiente, anchura, peralte, coeficiente de adherencia, etc). A partir de los resultados ofrecidos por el software de dichas simulaciones se establecerán las correspondientes conclusiones acerca tanto del comportamiento dinámico del vehículo como de las variables de mayor influencia en el consumo. Una vez obtenidos los resultados, se valorará la aptitud del Zytel Zero para su uso en distribución urbana de mercancías (DUM).

1.2 Objetivo y alcance.

Teniendo en cuenta la situación descrita en el apartado anterior se establecieron los siguientes objetivos para este TFM:

- Adquirir conocimiento sobre el manejo de la herramienta de software con la que realizar las simulaciones y análisis.
- Realizar un modelo del Zytel Zero lo más similar posible al prototipo real del vehículo y capaz de ser simulado en el software adquirido.
- Realizar un modelo de un trayecto urbano que sirva como plataforma de simulación para el modelo de vehículo creado y que sea susceptible también de ser utilizado por el prototipo real para futuros ensayos y pruebas.
- Simular el comportamiento del modelo de vehículo sobre la plataforma creada y analizar los resultados de la simulación haciendo énfasis en aquellos parámetros o prestaciones más importantes.
- Proponer modificaciones y posibles mejoras del modelo y comprobar su resultado y posible utilización en la vida real mediante simulación.
- Validar la viabilidad de uso del vehículo para distribución urbana de mercancías (DUM) a partir de los resultados obtenidos en la simulación

1.3 Introducción a los vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos que se desarrollan hoy en día no distan tanto como se pueda pensar de los vehículos de combustión interna más comunes. Los VE constan de unos componentes principales (elementos rodantes, chasis y carrocería) que son, en esencia, similares a los utilizados por los vehículos tradicionales; si bien en el caso de chasis y carrocerías, por ejemplo, se están haciendo esfuerzos por reducir su peso para disminuir el consumo energético.

Sin embargo, es en los componentes funcionales donde se observan las mayores diferencias entre los vehículos de un tipo y de otro. Con componentes funcionales se hace referencia al sistema eléctrico del vehículo formado por las baterías (de tracción y auxiliares), el control electrónico y, por supuesto, el motor eléctrico.

Los VE consumen alrededor de tres veces menos energía, su conducción es mucho más silenciosa y confortable. Además, constan de un gran número de ventajas medioambientales (más reciclables, menos contaminantes, más sostenibles, etc.). Sin embargo, no tienen la potencia, aceleración y velocidad máxima de los vehículos propulsados por motor de combustión interna. Estas características han provocado que las aplicaciones del vehículo eléctrico sean, de momento, como coche para tráfico urbano, vehículo de flota, autobús urbano, camión de recogida de basuras o motocicletas eléctricas.

1.4 Estructura de la Memoria.

En los siguientes apartados de esta memoria se explica con mayor profundidad y grado de detalle el trabajo realizado.

En primer lugar, se describirá el proceso de transformación del vehículo original en su actual versión eléctrica haciendo hincapié en la selección de los componentes fundamentales (vehículo original, motor eléctrico, baterías, elementos auxiliares, etc).

La siguiente etapa consistirá en la construcción de los modelos a simular, tanto del vehículo como de los trayectos que éste recorrerá, así como la elección del ciclo de conducción. De este modo, quedarán expuestos los parámetros característicos de cada una de las configuraciones masa de batería-mapa motor así como las herramientas empleadas para construirlos.

A continuación, vienen detallados el tipo de análisis realizado con cada configuración de masa de baterías-mapa motor, explicando qué restricciones y condiciones se han tenido en cuenta en la simulación, y también los resultados más llamativos tanto en los trazados llanos como en trazado con pendiente.

Seguidamente, se analizan comparativamente los resultados obtenidos para cada caso de simulación extrayendo las primeras conclusiones del estudio.

La memoria finaliza con una valoración de la aptitud del Zytel Zero para su uso en distribución urbana de mercancías (DUM) que recoge las conclusiones, posibilidades de continuación y resumen de este TFM.

2. Descripción del vehículo Zytel Zero.

El vehículo Zytel Zero es un vehículo eléctrico puro de grandes prestaciones y alta autonomía debido a los 120 módulos de batería que lleva integrados en su carrocería. El vehículo final es producto de la transformación de un vehículo todoterreno tradicional impulsado por un motor de combustión interna.

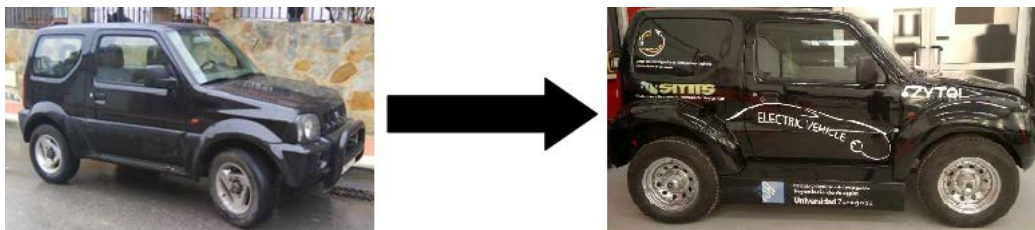


Figura 1. Transformación vehículo original en Zytel Zero.

Para llevar a cabo dicha transformación fue necesario realizar en primer lugar una selección de los nuevos elementos (motor eléctrico, baterías, elementos auxiliares, etc.) que se van a integrar en el vehículo final así como del propio vehículo original. Una vez finalizada el proceso de selección, se definió un protocolo de procedimientos para llevar a cabo el proceso de electrificación.

2.1 Selección del vehículo original.

Para satisfacer las necesidades del proyecto se estimaron dos posibles opciones dentro de las posibilidades de la empresa. La primera de ellas era la adaptación del vehículo eléctrico de Zytel que se encuentra en fase de desarrollo, Zytel Gorila, y la segunda era la compra de un vehículo diesel y realizar su posterior conversión a vehículo eléctrico.

Finalmente, tras evaluar ambas opciones, se adoptó la segunda solución ya que esta opción permitía que el proyecto se ejecutase más rápidamente, además de presentar una mayor versatilidad y una mayor fiabilidad, principalmente debido a la incertidumbre en el periodo de fabricación del vehículo Zytel Gorila.

Una vez adoptada la decisión de adquirir un vehículo para su posterior conversión a tracción eléctrica, se marcaron unos criterios de selección, los cuales fueron:

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

- ✓ Vehículo de bastidor independiente, por la simplificación que otorga este tipo de vehículos a los cambios estructurales del mismo y la gran capacidad de carga que permite. Por el contrario, la carrocería autoportante obliga a diseños muy complejos, donde cualquier modificación produce un cambio en sus características y por tanto la conversión resultaría de gran complejidad
- ✓ Vehículo, con al menos, dos plazas y espacio de carga para un mínimo de 600 kg de baterías.
- ✓ Vehículo de bajo peso para la obtención de mayores prestaciones finales.
- ✓ Una alta resistencia y fiabilidad de los componentes estructurales que garanticen la posible modificación de los mismos, así como un aumento de la carga a soportar.
- ✓ Máxima seguridad de los ocupantes, con un equipamiento mínimo de ABS y Airbag.
- ✓ Bajo coste de adquisición.

Una vez establecidos los criterios de selección se realizó un estudio del mercado local y nacional. Por razones económicas, se optó por el mercado de segunda mano. Se determinó que la gama de vehículos más adecuada para la electrificación sería la de aquellos modelos que dispusieran de un diseño de bastidor independiente, por lo que el número de candidatos quedaría presumiblemente minimizado, ya que la tendencia de los últimos 15 años en la fabricación de automóviles ha sido desarrollada en torno a la carrocería autoportante.

La siguiente tabla muestra la comparativa que se ha realizado con los vehículos que cumplen los criterios de selección:

Fabricante	Modelo	Largo [mm]	Ancho [mm]	Altura [mm]	Peso [kg]	MMA [kg]	Capacidad de carga [kg]	Potencia [CV]	Par [Nm]
Mitsubishi	Montero 96	4120	1695	1835	1695	2200	505	129	190
Suzuki	Santana-90	3440	1460	1690	960	1250	290	69	110
Suzuki	Jimny-05	3625	1600	1655	1140	1500	360	81	123
Toyota	Land Cruiser-92	4780	1829	1785	1690	2085	395	156	298
Toyota	RAV 4 -02	3710	1690	1660	1060	1360	300	125	161

Tabla 1. Posibles vehículos a elegir.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Analizando la tabla observamos como dos vehículos sobrepasan los 1.600 kg lo cual supondría un gran gasto energético en las continuas aceleraciones y daría lugar a un peso total del vehículo final superior a las dos toneladas. Descartados estos dos modelos, se seleccionó el vehículo Suzuki Jimny por su mayor capacidad de carga, mayor cantidad de dispositivos de seguridad, su fiabilidad y semejanza en dimensiones al modelo de Zytel, el Zytel Gorila.

Fabricante	Modelo	Largo [mm]	Ancho [mm]	Altura [mm]	Peso [kg]	MMA [kg]	Capacidad de carga [kg]	Potencia [CV]	Par [Nm]
Suzuki	Jimny-05	3625	1600	1655	1140	1500	360	81	123

Tabla 2. Vehículo seleccionado.

El vehículo Suzuki Jimny se caracteriza por ser un vehículo compacto, ligero, fuerte y fiable con tracción a las cuatro ruedas, diseñado para afrontar una práctica intensiva por todo tipo de terrenos con una capacidad de carga superior a los 350 kg.



Figura 2. Suzuki Jimny.

Estas cualidades hacen que sea el vehículo adecuado para realizar la conversión y alcanzar los objetivos definidos

2.2 Selección del motor eléctrico y el controlador.

Existen multitud de maneras de clasificar los motores eléctricos, la clasificación mostrada en la figura 3 está basada en el tipo de fuente de alimentación del motor, es decir, motores de corriente continua DC y motores de corriente alterna AC.

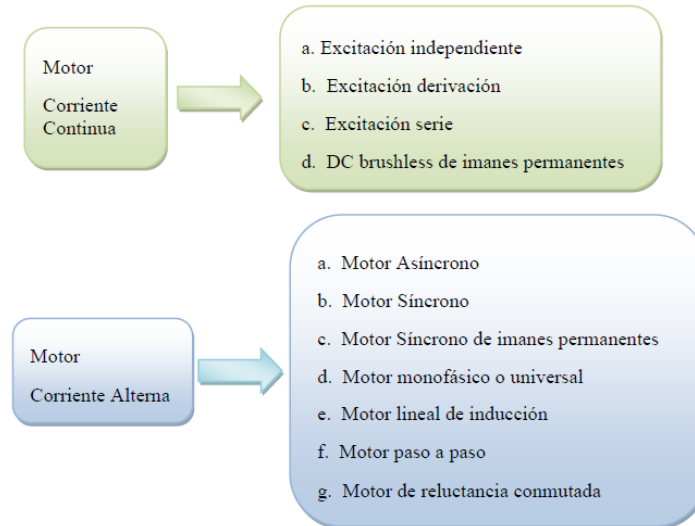


Figura 3. Tipos de motores eléctricos.

La elección fue por un motor de tipo DC Brushless de imanes permanentes debido a su elevado par máximo, altas velocidades de giro, alta aceleración, alta fiabilidad y una curva característica Par motor-Velocidad. Aunque debido al elevado precio de los motores DC Brushless, también se valoró como otra opción la posibilidad de elección de un motor asíncrono de jaula de ardilla.

Para la compra del motor, primeramente se realizó un análisis del mercado. Los criterios de selección se basaron en las características técnicas del proyecto y la tecnología existente. A continuación se expone los criterios utilizados:

- ✓ Alto par.
- ✓ Potencia superior a los 45 kW.
- ✓ Bajo peso.
- ✓ Alta eficiencia.
- ✓ Alta tensión de funcionamiento.
- ✓ Dimensiones contenidas, para su fácil ubicación.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Finalizada la búsqueda de distribuidores y fabricantes de motores, se realizó una primera selección de modelos de motores, y se elaboró una comparativa entre ellos mediante la siguiente tabla:

Ref. interna	PH150	PH145	PH125	PH100	PH75	HSM108	ASM54	WS36
Fabricante	UQM	UQM	UQM	UQM	UQM	Brusa	Brusa	Siemens
Tipo motor	BLDC	BLDC	BLDC	BLDC	BLDC	AC síncrono	AC inducción	PM síncrono
Potencia nominal [kW]	100	85	45	100	45	64	27	260
Potencia pico [kW]	150	145	125	100	75	98	54	-
Par nom [Nm]	400	250	150	400	150	130	65	2700
Par máximo [Nm]	650	400	300	550	240	200	192	4500
Rpm max.	5.000	8.000	8.000	5.000	8.000	11.000	11.000	3.500
Eficiencia [%]	95	94	94	90	94	95	95	-
Tensión [V]	340-420	340-420	300-420	300-420	240-420	360-400	300	750
Peso [kg]	91	50	41	91	41	51	49	500
Dimensiones (φ,L) [mm]	405,291	280,279	280,252	405,241	280,252	270,245	270,245	500,660

Tabla 3. Posibles motores a seleccionar.

Como puede observarse en la tabla 3, todos los motores disponen de una alta eficiencia, por encima del 90 %, con tensiones superiores a los 300 V y velocidad máxima superior a 5.000 rpm; siendo todos estos factores válidos para el diseño. Los factores que determinaron la selección del motor fueron la potencia específica (kW/kg) y sus dimensiones, destacando por encima del resto y siendo la elección final, el motor PH145 de UQM.

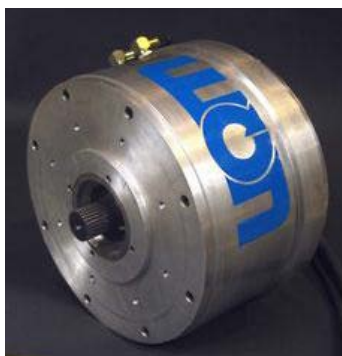


Figura 4. Motor UQM.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

El motor PH145, figura 4, del fabricante estadounidense UQM es un motor DC Brushless de alta eficiencia con una potencia específica de 2,90 kW/kg, cumpliendo todos los criterios marcados a priori:

Modelo	SPM218-143-3
Longitud [mm]	279
Diámetro [mm]	280
Peso [kg]	50
Potencia pico [kW]	145
Potencia nominal a 5.000 rpm [kW]	85
Par máximo [Nm]	400
Par nominal [Nm]	250
Velocidad máxima [rpm]	8.000
Eficiencia máxima [%]	94
Potencia específica [kW/kg]	2,90

Tabla 4. Características del motor UQM.

En la figura 5 se muestra, las curvas de potencia-velocidad del motor UQM:

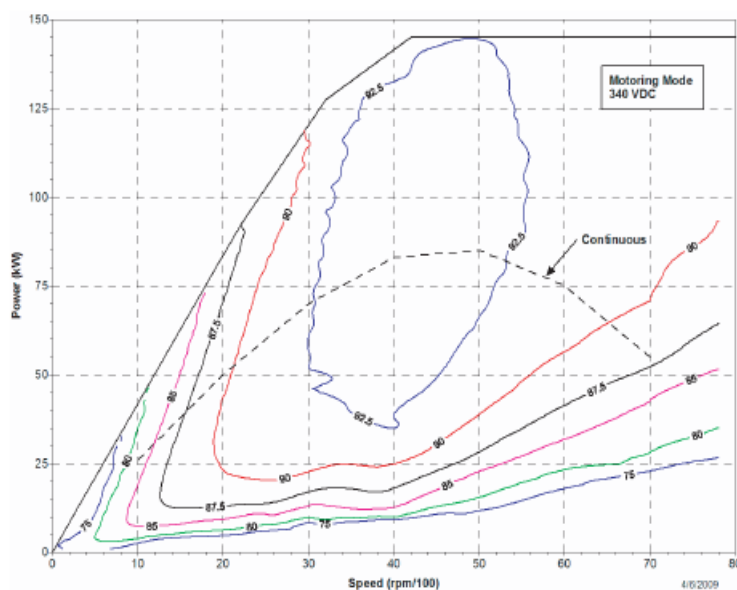


Figura 5. Diagrama Potencia (Kw) – Velocidad (rpm/100).

El motor UQM PH145 cuenta para su funcionamiento con un controlador del propio fabricante, el controlador/inversor DD45 – 500L. Este controlador está basado en una arquitectura de medio puente con 3 IGBT como elementos de potencia y un procesador digital de las señales (DSP).

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

La incorporación del DSP permite que el controlador, además del control del motor, incorpore comunicación serie, compatibilidad con CAN Bus, capacidad de diagnóstico, lectura de velocidad y lectura de la temperatura del motor y del controlador.

El controlador permite gobernar al motor de tres modos diferentes: control de par, control de velocidad y control de tensión.

El conjunto controlador – motor es una máquina capacitada para trabajar en los cuatro cuadrantes de funcionamiento, por lo que será posible su funcionamiento como generador, o lo que es lo mismo, dispondrá de la función de frenado regenerativo.

Tensión		Dimensiones	
Rango de tensiones nominales	340 a 420 VDC	Longitud	380 mm
Rango de operación	240 a 420 VDC	Ancho	365 mm
Tensión mínima de funcionamiento	240 VDC	Alto	119 mm
Corriente máxima	500 A	Peso	16 kg

Tabla 5. Características técnicas del controlador.

Inversor		DSP TI2812	
Tipo de control	PWM 3-Fases BLDC	Tensión nominal	12 VDC
Dispositivo de potencia	3 x IGBT half bridge	Rango de tensiones de entrada	8 a 15 VDC
Frecuencia de conmutación	12,5 kHz	Rango de corrientes	0,3 a 0,5 A
Consumo Standby	17 W		

Tabla 6. Rango de corrientes y tensiones.

El circuito eléctrico del conjunto motor – controlador describe la conexión entre el motor, el controlador y las baterías, como circuito de potencia y el conductor, como circuito de control.

La conexión eléctrica entre el motor y el controlador dispone de tres tipos de conexiones diferentes. La primera de ellas es la conexión de potencia, con los cables que conectan el motor al controlador instalados de fábrica en el motor. La segunda es la conexión de transmisión de datos mediante un conector amphenol-21 derecho del controlador. La tercera es la unión de las carcasas entre el motor y el controlador para equilibrar el potencial eléctrico entre ellas y reducir así la emisión de contaminación electromagnética, comportándose ambos como una jaula de Faraday.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

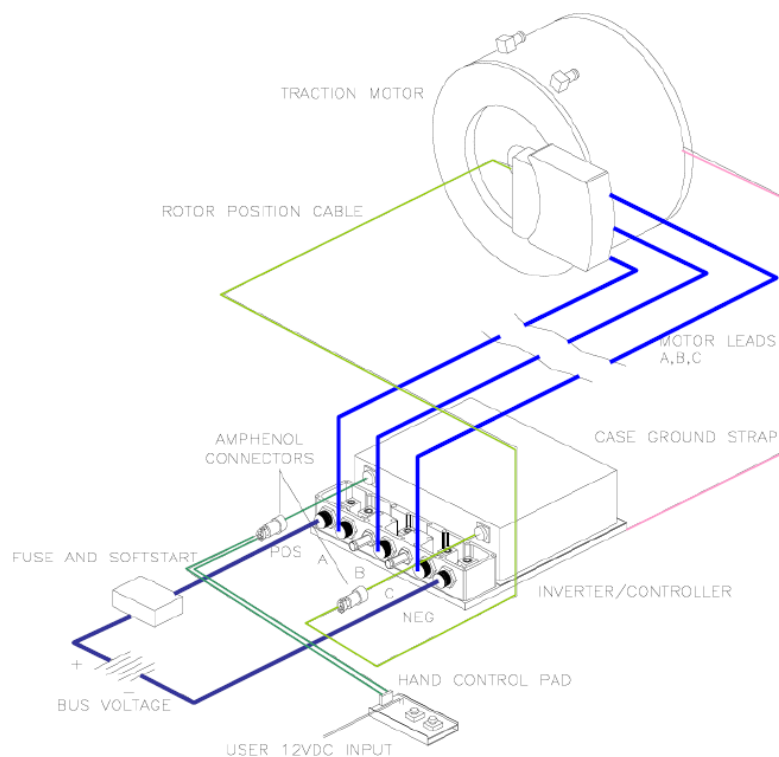


Figura 6. Conexiones de cableado.

UQM Technologies INC suministra un software de diagnóstico y configuración con sus motores. Este software permite visualizar y recoger la información de las condiciones del sistema a través de los diferentes sensores del motor y del controlador.



Figura 7. Software de control.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Además, permite la configuración de los parámetros del motor proporcionando flexibilidad de configuración y adaptación a las exigencias de cada etapa obtener las máximas prestaciones del vehículo.

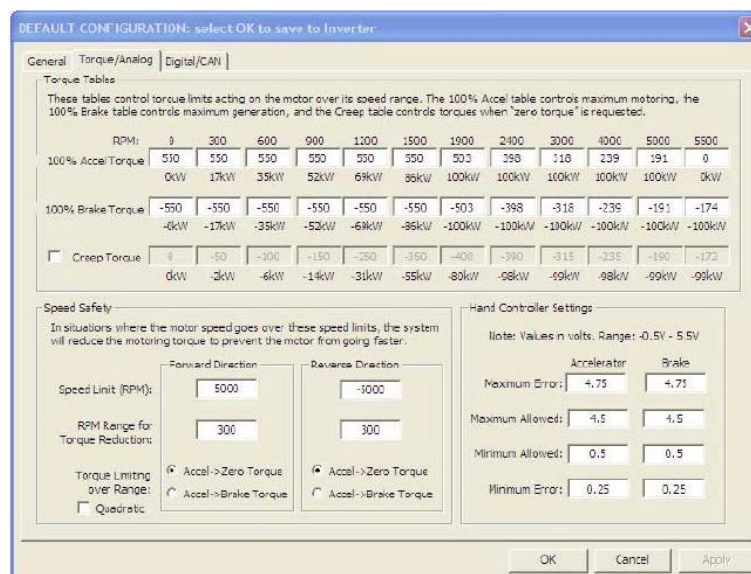


Figura 8. Configuración de parámetros mediante el software.

2.3 Selección y disposición de las baterías.

La elección de un tipo de baterías u otro determina el peso del vehículo, la descarga máxima, la potencia del motor y los ciclos de vida de las baterías.

Atendiendo a los resultados de los cálculos realizados para obtener las necesidades energéticas que permitan cubrir la autonomía deseada, las baterías deben almacenar 70 kWh de energía con una limitación de 700 kg. Estos valores de energía y peso dan lugar a que las baterías deben tener una energía específica superior a 100 Wh / kg, por lo que según las tablas existentes las dos tipologías de baterías a emplear son las baterías basadas en compuestos de Litio o de Sodio.

Las baterías de Sodio trabajan a una temperatura muy alta (>250°C) lo que compromete la seguridad de los ocupantes y la fiabilidad del conjunto. Esto hace que la tipología de batería seleccionada esté basada en baterías de Litio.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

En cuanto a sus características:

- ✓ Alta energía específica, superior a 100 Wh/kg.
- ✓ Alta potencia específica, superior a 200 W/kg.
- ✓ Alta capacidad de descarga, superior a 3C (Capacidad de la batería [Ah]).
- ✓ Alta capacidad de carga, superior a 1C.
- ✓ Baja sensibilidad a la temperatura.
- ✓ Baja autodescarga, menor a 1% por semana.
- ✓ Ciclos de vida útil, superior a 500 ciclos.
- ✓ Baja resistencia interna, inferior a 5 mΩ.

Un dato obtenido de la elección del motor UQM PH145 es el rango de tensiones para el funcionamiento del motor, que se encuentra entre los 250 V de tensión mínima y los 420 V de tensión máxima. De la misma manera este grupo de baterías debe ser capaz de alcanzar, en condiciones de seguridad, la corriente de descarga máxima a la que serán sometidas por el inversor del motor, 500 A con una duración máxima de 20 segundos.

A continuación, se expone una tabla con las baterías candidatas a ser elegidas y los datos citados en el párrafo anterior:

<i>Fabricante</i>	<i>Ref.</i>	<i>Tensión [V]</i>	<i>Tensión mín [V]</i>	<i>Cap [Ah]</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Nº Bat.</i>	<i>Peso bat. [kg]</i>	<i>Vol. Bat [l]</i>	<i>Tensión nom [V]</i>	<i>Tensión mín [V]</i>
Tianjin Lantian	ICR65/400	3,7	3	100	2,6	189	492	300	699,3	567
Thunder Sky	LFP100AHA	3,7	2,5	100	3,2	189	605	410	699,3	472
Thunder Sky	LFP160AHA	3,7	2,5	160	5,6	118	662	423	436,6	295
Sky Energy	SE130AHA	3,4	2	130	4,4	158	697	464	537,2	316
Sky Energy	SE180AHA	3,3	2	180	5,6	118	659	430	389,4	236

Tabla 7. Baterías candidatas a ser seleccionadas.

Finalmente, de acuerdo a los criterios establecidos la batería seleccionada es la SE180AHA del fabricante Sky Energy.

<i>Fabricante</i>	<i>Ref.</i>	<i>Tensión [V]</i>	<i>Tensión mín [V]</i>	<i>Cap [Ah]</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Nº Bat.</i>	<i>Peso bat. [kg]</i>	<i>Vol. Bat [l]</i>	<i>Tensión nom [V]</i>	<i>Tensión mín [V]</i>
Sky Energy	SE180AHA	3,3	2	180	5,6	118	659	430	389,4	236

Tabla 8. Batería seleccionada.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

La batería de tracción del vehículo está compuesta por 120 unidades, con referencia SE180AHXXX (XXX – Número de posición de la batería) conectadas en serie y repartidas en 4 ubicaciones diferentes en el vehículo.

El conjunto de baterías proporcionan una energía total de 71.280 Wh, a 396 VDC de tensión nominal, con una tensión mínima de 240 VDC y un peso de 672 kg. La resistencia interna ofrecida por el conjunto de baterías es de 360 mΩ.

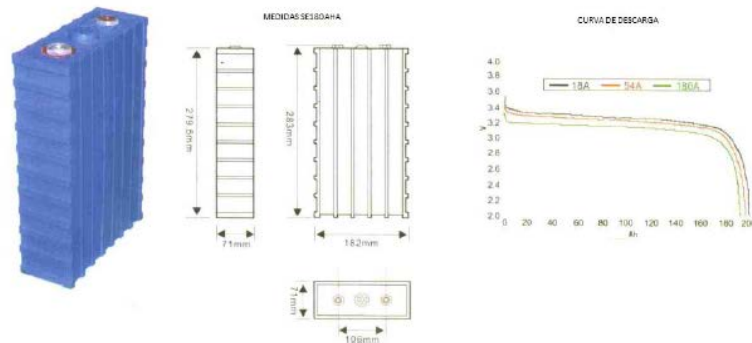


Figura 9. Batería SE180AHA del fabricante Sky Energy.

Como se ha descrito anteriormente, las baterías se reparten en cuatro ubicaciones distintas dentro del vehículo:

➤ Cajón trasero:

Situado en la parte trasera de los asientos delanteros. Es el lugar donde se concentra un mayor número de módulos de batería.



Figura 10. Cajón trasero de baterías.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

➤ Faldón trasero:

Se encuentra en la parte trasera del vehículo, justamente debajo de la puerta del maletero donde se ubica el cajón trasero.



Figura 11. Faldón trasero de baterías.

➤ Faldones laterales izquierdo y derecho:

Situados en la parte lateral de vehículo, se colocan debajo de las puertas del coche:



Figura 12. Faldón lateral derecho.

El sistema de baterías es un componente crucial en el desarrollo del proyecto, esto motiva a realizar principalmente una serie de pruebas para definir correctamente la batería y conocer su comportamiento.

En un principio se cuenta con la información proporcionada por el fabricante, aun así es importante realizar ensayos sobre las baterías:

- **Medición de la Resistencia Interna de la batería.**

Las fuentes de tensión, en este caso en forma de batería no son perfectas. Una fuente de tensión real está compuesta de una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia interna.

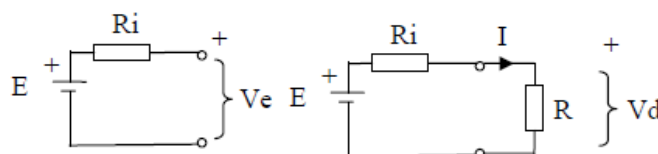


Figura 13. Medición de la Resistencia Interna de la batería

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Esta resistencia interna es una resistencia deducida por el comportamiento de la batería, dando lugar a pérdidas en forma de calor y limitando la capacidad de descarga.

- **Obtención de la Curva de Descarga de la batería.**

La obtención de la curva de descarga proporciona información sobre como varía la tensión de la batería en función de la corriente extraída y la duración de la descarga.

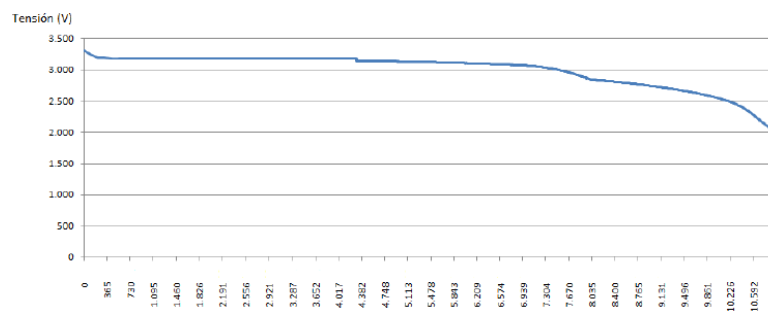


Figura 14. Curva de Descarga de la batería.

Esta información es imprescindible para conocer cómo se comporta el conjunto de baterías ante descargas prolongadas.

- **Proceso de Equilibrado de las baterías.**

Para obtener la máxima energía almacenada en el conjunto de la batería de tracción, cada batería debe ser equilibrada individualmente durante la operación de carga.



Figura 15. Equilibrado de las baterías.

Esta acción no es posible debido al tipo de batería, por lo que se adopta la solución de realizar el equilibrado previamente al montaje de las baterías en el vehículo

2.4 Selección de elementos auxiliares.

Los sistemas que integra un vehículo equipado con un motor térmico varían al incorporar el motor eléctrico debido a que se modifican o se eliminan algunos de sus componentes. Además, para el funcionamiento del vehículo de tracción eléctrica es necesario introducir otros sistemas nuevos.

En este apartado, se estudian las modificaciones de los sistemas existentes y su adaptación y los nuevos sistemas que hubo que incorporar.

➤ Sistema de refrigeración:

La refrigeración del motor y controlador se realiza por medio de un circuito de agua. El circuito de refrigeración lo componen la bomba de agua (encargada de la circulación del refrigerante), el radiador principal, el radiador calefactor del habitáculo, el vaso de expansión (encargado de equilibrar las presiones del circuito y almacenar el refrigerante), los manguitos y su racorería, el motor y el controlador.

La conexión entre el controlador, el motor y el sistema de refrigeración debe realizarse atendiendo a las instrucciones de diseño del fabricante UQM, como se ve a continuación:

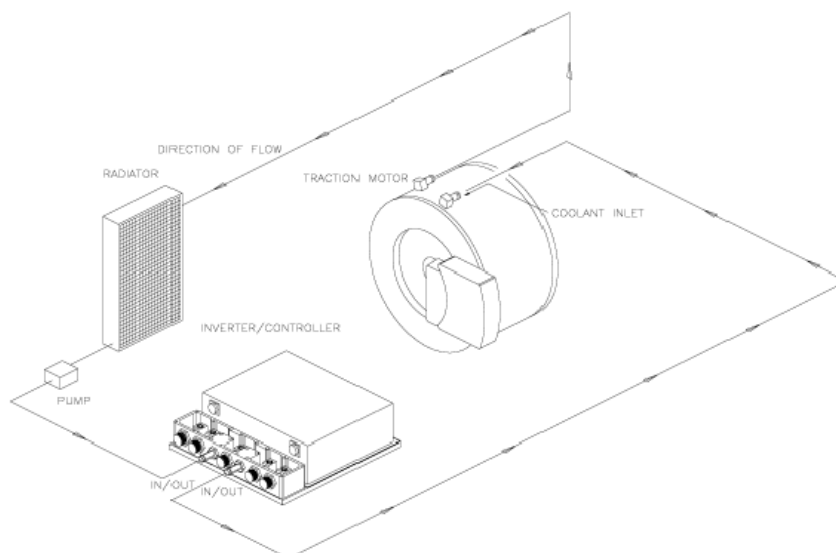


Figura 16. Sistema de refrigeración.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

El dimensionamiento del radiador es una tarea compleja. Por ello, se selecciona un radiador de motocicleta de 300 x 200 x 50 mm, que está suficiente sobredimensionado para evacuar el calor que se pueda generar. En caso de ser excesivo este radiador, se está proporcionando una mejor temperatura de funcionamiento para el motor y el controlador (<50°C).

➤ Sistema de frenos:

El grupo de presión de los sistemas de frenos de los vehículos equipados con motor de combustión trabaja mediante la conexión del colector de admisión con el cilindro maestro de la bomba de freno. Esta conexión se realiza para aprovechar la depresión provocada en el colector de admisión por la succión de los cilindros del motor. Esta depresión sirve para crear un vacío en la asistencia del freno que ayudará a que la frenada se logre con un menor esfuerzo.



Figura 17. Conexión del sensor y válvula amal.

En un vehículo eléctrico no existen elementos que generen esta depresión, por esto, es necesario incorporar una bomba de vacío eléctrica.

La bomba de vacío seleccionada es la bomba VBS-EV-12 con alimentación a 12 VDC, que incorpora la bomba depresora, el filtro, la válvula amal, un sensor de presión, su fusible de 60 A y el relé de activación.

➤ Sistema de dirección:

El vehículo está equipado con dirección asistida. Esta dirección asistida es de tipo hidráulico, por lo que para su funcionamiento es necesaria una bomba de presión. La bomba de presión estaba unida mediante la correa auxiliar con el cigüeñal del motor de combustión, por lo que éste le proporcionaba la energía necesaria para elevar la presión en el circuito hidráulico.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Al eliminar el motor de combustión, la bomba de dirección asistida no es viable, ya que en caso de emplearla mediante la unión con el motor eléctrico surge un inconveniente cuando el vehículo se encuentra parado. Cuando el vehículo está parado (aparcado, ante un semáforo o un paso de peatones) la velocidad de giro del motor eléctrico es 0 rpm, por lo que la bomba de dirección asistida tampoco gira, siendo necesario un mayor esfuerzo para mover el volante, perdiendo confort y seguridad.

Como se desea mantener la dirección asistida se incorpora una bomba hidráulica eléctrica del sistema de dirección asistida de un Renault Kangoo. La bomba seleccionada se alimenta a 12 VDC y tiene un consumo máximo de 50 A.

➤ Sistema auxiliar de baterías:

Los sistemas que requieren alimentación eléctrica, a excepción de la cadena de tracción, son alimentados a 12 VDC. Para evitar la disminución de la autonomía y la incorporación de un convertidor DC / DC de gran potencia, se ha optado por añadir dos baterías auxiliares de plomo de 12 VDC y 75 Ah (570 A) conectadas en paralelo.

La incorporación de estas baterías al sistema eléctrico implica la recarga de las mismas. Para evitar la necesidad de una segunda fuente de alimentación y su correspondiente cargador para la recarga de las baterías auxiliares se ha acoplado el alternador que equipaba el vehículo a la salida delantera de la caja de transmisión mediante una correa (figura 18). De esta manera, durante el movimiento del vehículo garantizamos la alimentación de todos los sistemas.



Figura 18. Alternador.

Existe la posibilidad, en caso de avería del alternador o una parada prolongada, de que las baterías auxiliares queden descargas. Esto ocasionaría el fallo de todos los sistemas alimentados a 12 VDC e imposibilitaría la tracción, haciendo necesaria la asistencia al vehículo.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Para evitar esto se incorpora un convertidor DC / DC de baja potencia. El convertidor incorporado es el ASTEC AIF50B300-L de 600 W de potencia, con una tensión de entrada de 250 a 420 VDC y una salida de 12 VDC y 50 A. Esto es suficiente para mantener alimentados los sistemas elementales desde las baterías de tracción y garantizar así el movimiento del vehículo.

➤ Sistema electrónico de potencia:

La arquitectura de los inversores requiere la utilización de un *Buffer* o almacenamiento de energía mediante condensadores (más ligeros y baratos que las bobinas).

Los condensadores tienen la propiedad de que tienden a cargarse de forma muy rápida. En el momento de aplicación de una diferencia de potencial, el condensador absorbe una corriente de pico muy elevada si está descargado. En el caso de vehículos eléctricos este pico puede alcanzar valores superiores a los 1.000 A. Para reducir esta intensidad, la solución adoptada, bajo consejo del fabricante, es la introducción de un circuito de limitación de corriente durante la carga del condensador.

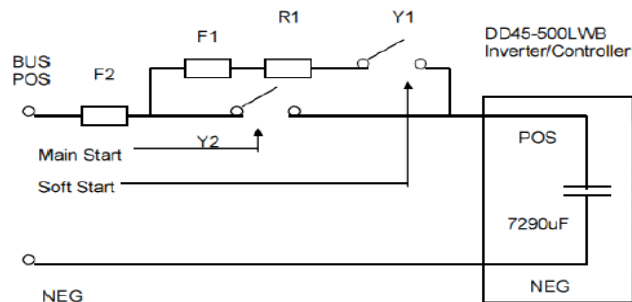


Figura 19. Arranque suave o Softstart.

Este sistema se denomina *arranque suave* o *Softstart* y consiste en un circuito formado por dos contactores, dos fusibles y una resistencia de potencia, conectados tal como se muestra en la figura x. La resistencia de potencia conectada en serie con la entrada del inversor limita el pico de intensidad o, lo que es lo mismo, amplía el tiempo de carga del condensador suavizando su gráfica de carga.

Los fusibles deben estar dimensionados para soportar la tensión de bus y la corriente que circula por ellos. Esto mismo, se aplica para la selección de los contactores. La resistencia de potencia se dimensiona de manera que limite la corriente a valores próximos a un 10 % de la corriente nominal y una potencia de disipación determinada

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

por la ecuación de Joule. Los datos para el cálculo fueron proporcionados por el fabricante UQM.

➤ **Battery Management System (BMS):**

Definido el conjunto de baterías que conectadas en serie forma la batería de tracción, es necesario introducir un sistema para visualizar y controlar el estado de cada batería, denominado BMS (Battery Management System).

El sistema del BMS permite obtener una lectura en tiempo real de la tensión de cada batería y la temperatura de cada conjunto de 10 baterías. También permite la visualización de la corriente que entra o sale de las baterías.



Figura 20. Battery Management System.

Con estos datos el BMS nos muestra en su pantalla principal la tensión total de las baterías, la intensidad que recorre las baterías, la energía restante almacenada, la batería a mayor tensión, la batería a menor tensión y la sonda que registra mayor temperatura (figura 20).

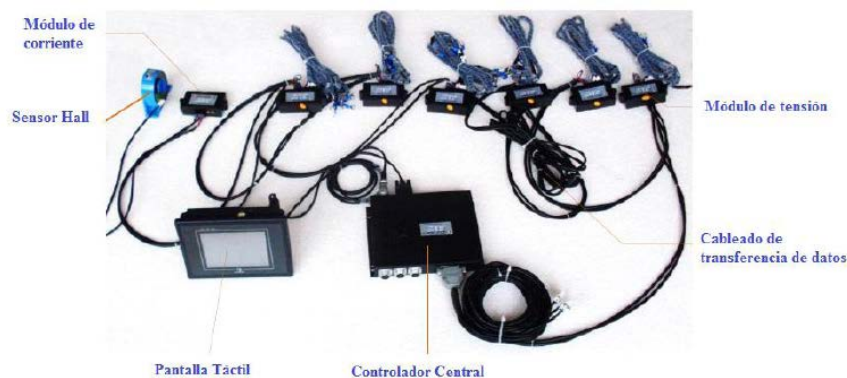


Figura 21. Equipo BMS.

2.5 Proceso de electrificación.

El proceso de electrificación del vehículo consta de siete fases diferenciadas en orden cronológico, con la posibilidad de solapamiento entre ellas. Estas fases están distribuidas de la siguiente manera:

a) Desmontaje de elementos MACI y carrocería						
b) Adaptación de los sistemas existentes						
c) Implementación y montaje de nuevos componentes						
d) Modificación de la carrocería						
e) Montaje y ajuste de la tracción eléctrica						
f) Montaje del circuito eléctrico y de las baterías						
g) Test y revisión de los componentes						

Figura 22. Diagrama de proceso de electrificación.

A continuación, son detalladas las fases del proceso:

a) Desmontaje de elementos MACI y carrocería.

Se desmontan del vehículo aquellos elementos que posibilitan el funcionamiento del motor de combustión interna ya que carece de sentido que continúen incorporados a él. Con ello se obtiene una reducción del peso del conjunto y una liberación de espacio para albergar los nuevos componentes.

Los principales componentes eliminados son: motor, sistema eléctrico de inyección, sistema de refrigeración, sistema de aire acondicionado, sistema de escape, depósito y bomba de combustible, caja de cambios, etc.



Figura 23. Desmontaje de elementos MACI.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Posteriormente se desmontan los principales componentes de la carrocería susceptibles de daño, como son las puertas, capó y paragolpes. Finalmente es separada la carrocería del bastidor para realizar una inspección visual del estado de ambos componentes y facilitar el trabajo sobre el bastidor de adaptación de los nuevos componentes.

Una vez inspeccionado el bastidor se procede a desmontar todos sus elementos para tomar las medidas necesarias para la incorporación de los distintos componentes.

b) Adaptación de los sistemas existentes.

Aquellos sistemas que pueden ser utilizados parcialmente, ya que necesitan la incorporación o modificación de componentes, se adaptan a las nuevas necesidades. Estas adaptaciones se realizan previamente a la electrificación del vehículo. Están afectados el sistema de refrigeración (adaptación del sistema calefactor al nuevo sistema para la refrigeración del motor eléctrico y su controlador), de frenos (adaptación de nuevos manguitos metálicos de freno al cilindro maestro), de suspensión (montaje de nuevos muelles y amortiguadores), el eléctrico y el electrónico (adaptación de señales eléctricas, de control e instrumentalización por haber suprimido la Unidad Central Electrónica que tenía inicialmente el vehículo).

Debido al aumento del peso, los ejes son sustituidos por unos mayores (preparados para soportar cargas de 2.000 kg) y modificados para permitir adaptar los nuevos brazos de suspensión. De esta manera se amplía la vía del vehículo en 20 cm, mejorando su estabilidad.



Figura 24. Sustitución de ejes.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Estos ejes provienen de un Land Rover, que disponen de frenos de disco a las cuatro ruedas (anteriormente el Suzuki Jimny contaba sólo con frenos de tambor en su eje trasero) y de un diferencial preparado para soportar mayor par. Por el contrario se adquieren nuevas llantas, ya que la tornillería del cubo es diferente.

c) Implementación y montaje de nuevos componentes.

Esta fase estaría íntimamente relacionada con la anterior, en ella se realiza la incorporación de los componentes nuevos necesarios para la total adaptación del vehículo, a excepción del sistema eléctrico de potencia y tracción.



Figura 25. Montaje de nuevos componentes.

Los componentes incorporados son: sistema de refrigeración (bomba de agua, radiador, racorería y manguitos), sistema de freno (bomba depresora), baterías auxiliares, soporte para controlador, sistema de dirección (bomba de dirección eléctrica y acople a los ejes), convertidor DC/DC, nuevos faros.

d) Modificación de la carrocería.

La modificación de la carrocería se realiza para permitir la incorporación de nuevos componentes y para que el aspecto del vehículo sea lo más parecido posible al Zytel Gorila. Para ello deben modificarse el capó, los laterales de la carrocería, ambos paragolpes y los faros delanteros. Estos trabajos se efectúan de forma manual mediante la utilización de fibra de vidrio y masilla. Posteriormente, se realiza el pintado.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO



Figura 26. Modificaciones en carrocería.

Esta fase incluye la fabricación y la incorporación de los cajones de las baterías a la carrocería. Estos cajones están realizados en acero inoxidable y son aislados mediante goma para evitar cortocircuitos.



Figura 27. Cajón ubicado en la parte trasera del habitáculo

De esta manera, la carrocería está preparada para el montaje de la cadena de tracción y el sistema eléctrico de potencia.



Figura 28. Cajones laterales.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Tres de estos cajones están alojados en la carrocería (uno en el interior y dos en los laterales) y un cuarto cajón atornillado al bastidor.



Figura 29. Cajón atornillado al bastidor.

e) Montaje y ajuste de la tracción eléctrica.

Para incorporar el conjunto formado por el motor, el controlador, y la transmisión al vehículo se realizan unas piezas de fijación. Posteriormente, se efectúa el montaje y el alineamiento del árbol de transmisión con el diferencial trasero y, una vez finalizado, se procede a la colocación de la carrocería sobre el bastidor.



Figura 30. Cadena de tracción eléctrica.

Previo a esto, es necesario mecanizar una pieza de acero inoxidable para hacer posible el acoplamiento entre la caja de transferencia y el motor. Esta pieza está lubricada con el mismo aceite de la caja de transferencia, lo cual garantiza el correcto funcionamiento de la cadena de tracción.



Figura 31. Acoplamiento entre caja de transferencia y motor.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

Paralelamente, debido a que los discos de freno del nuevo eje trasero no disponen de freno de estacionamiento es necesario encontrar una manera de realizar esta función. Se ha optado por la incorporación de un juego de freno de disco a la salida de la caja de transferencia. Su pinza de freno es accionada de forma mecánica mediante la palanca de freno de mano alojada en el interior de la carrocería.



Figura 32. Accionamiento freno de estacionamiento.

Como puede verse en la figura 32, el árbol de transmisión que debería estar ubicado en la salida delantera de la caja de transferencia, fue anulado (se convirtió en un vehículo de tracción trasera). Dicha salida es aprovechada para la colocar un alternador capaz de generar 14 V para recargar las baterías auxiliares.

f) Montaje del circuito eléctrico y de baterías.

Esta fase se realiza al final del proceso de electrificación; debido al peso de los elementos colocados, los riesgos de choque eléctrico y la necesidad de cablear el vehículo. Dicha fase consiste en la colocación y conexión de los diferentes componentes del circuito eléctrico de potencia, las protecciones eléctricas y mecánicas, sus conectores y los elementos de fijación a la estructura.



Figura 33. Montaje de baterías en el cajón trasero.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

El cableado del vehículo implica la instalación de abrazaderas y la realización de orificios pasantes. Hay que prestar especial atención en que a lo largo del recorrido del cableado no exista la posibilidad de aplastamiento o roce continuo del cable que implique su deterioro prematuro o seccionamiento.



Figura 34. Montaje de baterías en el faldón trasero.

A continuación se colocan las baterías en sus respectivos cajones, se presan los cables a sus conectores y se atornillan las pletinas de cobre, quedando conectadas las baterías en serie. En este punto se aprovecha a conectar los terminales necesarios para monitorizar la tensión de cada batería.



Figura 35. Conexión de baterías del faldón trasero.

A partir de este momento se debe atender al riesgo de la presencia de tensión, por lo que se emplean guantes aislantes para los siguientes trabajos.



Figura 36. Conexión de baterías del cajón trasero.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO ZYTEL ZERO

De esta manera, el vehículo está preparado para realizar las primeras pruebas de montaje y así poder dar “sus primeros pasos”.

g) Test y revisión de componentes.

Finalizadas las fases anteriores y realizadas las pruebas iniciales de cada componente, se procede al test exhaustivo sistema por sistema para terminar con un test completo del vehículo. Así mismo se detectan los defectos y las carencias de diseño y/o montaje que puedan surgir, siendo corregido cualquier fallo.

Terminada esta fase concluye el proceso de electrificación y el vehículo está listo para cumplir los objetivos establecidos.

3. Modelado de la arquitectura del Zytel Zero.

En este apartado se expone, en primer lugar, la herramienta de simulación elegida para analizar el vehículo y los diferentes subsistemas del vehículo que hay que modelar para conseguir el modelado del vehículo completo.

A continuación, se explica la situación inicial y el trabajo previo en que se apoya este TFM, así como las primeras tareas realizadas previas al modelado. Seguidamente, se describe la metodología de dicho modelado y las aproximaciones realizadas para construir los modelos de cada uno de los subsistemas.

Por último, se presentan las tablas que recogen los parámetros que modelan cada uno de los subsistemas que forman el vehículo.

3.1 Herramienta de simulación Adams/Car.

Para realizar el análisis del vehículo Zytel Zero se requirió de un programa de simulación que permitiera la construcción un modelo del vehículo con alto grado de detalle y, al mismo tiempo, la libertad de crear nuestros propios análisis a los que someterlo. Por estos dos motivos se adquirió el software Adams, que entre sus módulos cuenta con uno especializado en el análisis de automóviles: Adams/Car.

Con Adams/Car es posible construir y testear rápidamente prototipos virtuales funcionales de vehículos completos así como de los subsistemas que los forman. Trabajando con Adams/Car, se pueden someter diferentes diseños de vehículos a varias condiciones de conducción igual que se llevarían a cabo ensayos en laboratorios con prototipos reales.

Adams/Car realiza la construcción de modelos de vehículos como el ensamblaje de los diferentes subsistemas que los forman. Por tanto, se debe construir cada subsistema de la forma más parecida a su homólogo real para que su posterior ensamblaje dé como resultado un vehículo completo similar al prototipo real y capaz de ser simulado con exactitud.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

El modelo del Zytel Zero cuyo comportamiento se simulará con Adams/Car consiste en el ensamblaje de los siguientes subsistemas:

- Ruedas
- Frenos
- Suspensión delantera
- Suspensión trasera
- Dirección
- Motor
- Chasis

Para aproximar cada subsistema a la realidad lo máximo posible, Adams/Car permite la configuración de varios parámetros (diferentes para cada uno de los subsistemas). Estos parámetros han sido obtenidos de tres formas: proporcionados por Zytel, calculados o aproximados.

3.2 Situación inicial.

El presente TFM se apoya en un trabajo previo que consistía en un modelo del vehículo realizado con un programa de CAD, SolidWorks (un programa de diseño asistido por computador para modelado mecánico), que contenía la representación de algunos de los subsistemas anteriormente mencionados pero que no podía ser simulado.

La información gráfica del Gorila EV se encontraba en un principio en formato IGES. En la figura 37, se puede ver la representación del Zytel Zero importando el archivo IGES con el software SolidWorks.

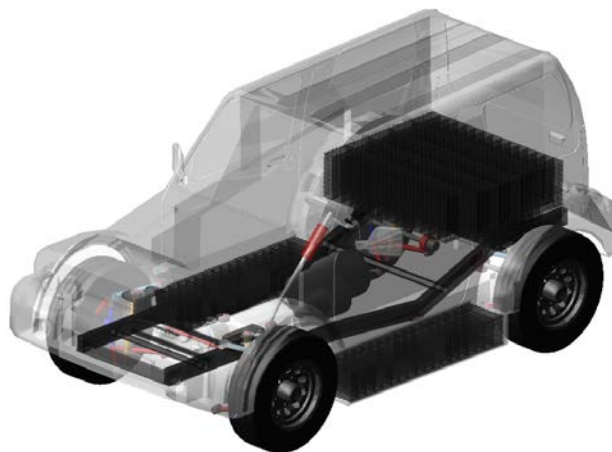


Figura 37. Modelado del Zytel Zero.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

Como puede observarse en la figura 37, el modelo del Zytel Zero consta de los siguientes subsistemas: chasis, neumáticos, motor, suspensiones, frenos y dirección. Sin embargo, para la importación de la representación gráfica del Zytel Zero en Adams/Car no será utilizado el formato IGES. Esto se debe principalmente a dos razones. La primera, el nivel de tolerancia necesario para que se importe con la misma calidad que en SolidWorks es tan bajo que provoca errores en Adams/Car durante el proceso de importación. Y la segunda, al utilizar estos formatos el modelo del vehículo es importado como un único sólido, es decir, Adams/Car no distingue las ruedas, el motor o el chasis como sólidos diferentes e independientes.

El formato de archivo que permite solucionar estos problemas es Parasolid (.xmt_txt). La obtención de un archivo de este tipo es muy simple. Una vez abierto en SolidWorks, el archivo IGES con el modelo del Zytel Zero, sólo hay que exportarlo y elegir el tipo de archivo Parasolid de entre todos los que ofrece el programa.

Como ya se ha comentado, para modelar el Zytel Zero se deben modelar los subsistemas que lo forman y ensamblarlos. Sin embargo, todos los subsistemas no van a seguir el mismo proceso de modelado ya que de unos existen archivos Parasolid con su representación gráfica (ruedas, chasis y motor) y de otros no (frenos, dirección y suspensiones).

Adams/Car proporciona una biblioteca con modelos sencillos de todos los subsistemas que necesita el vehículo para ser simulado y que se usarán como base para crear los propios del Zytel Zero.

En el caso de los subsistemas con archivos Parasolid, el proceso es el siguiente: abrir en Adams/Car el modelo de subsistema correspondiente de su biblioteca, eliminar los elementos de geometría que lo representan, importar el archivo creado correspondiente con la geometría propia del subsistema del Zytel Zero y dotar al subsistema de los parámetros y propiedades necesarios.

Por otro lado, para los subsistemas de los que se carece de archivo Parasolid, el método es el siguiente: abrir en Adams/Car el modelo del subsistema a modelar contenido en su biblioteca, modificar la topología para asemejarlo al subsistema montado en el prototipo real del Zytel Zero y dotarlo de los parámetros y propiedades característicos.

3.3 Modelado de los subsistemas.

A continuación, se muestra el modelado de los distintos subsistemas que conformarán el ensamblaje final. Cada uno de ellos estará caracterizado por unos parámetros y características diferentes.

❖ Subsistema de las ruedas:

Adams/Car distingue dos subsistemas diferentes en lo que a las ruedas se refiere, uno para las dos ruedas delanteras y otro para las dos traseras. Debido a que el Zytel Zero monta los mismos neumáticos en las cuatro ruedas y, por tanto, los cálculos serán los mismos para las ruedas delanteras y traseras, no se realizará ninguna distinción entre ellas. En el programa, sí que existirán dos archivos con los mismos parámetros que harán referencia a cada par de ruedas por separado.

En primer lugar, se importa la geometría creada con SolidWorks a Adams/Car. En la figura 38 se muestra el resultado:



Figura 38. Modelado de las ruedas.

Como se relata en el párrafo anterior, se generan dos archivos definidos como subsistemas: el primero para las ruedas delanteras y el segundo para las ruedas traseras. Ambos estarán presentes en el ensamblaje final del vehículo.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

Para finalizar la configuración de los neumáticos, debemos especificar los valores de los siguientes parámetros:

RUEDAS		
Parámetro	Valor	Unidad
Rigidez vertical	400	N/mm
Rigidez lateral	190	N/mm
Amortiguación vertical	0,15	N·s/mm
Resistencia a la rodadura	0,015	
Anchura	225	mm
Relación de aspecto	0,8	
Radio sin carga	367	mm
Masa	28	kg
Inercia Ixx	$1,73 \cdot 10^4$	kg·mm ²
Inercia Iyy	$1,73 \cdot 10^4$	kg·mm ²
Inercia Izz	$2,51 \cdot 10^4$	kg·mm ²

Tabla 9. Parámetros del subsistema ruedas.

Los parámetros se obtienen tanto de los datos que proporciona el fabricante del neumático como del modelo de CAD en el caso de las inercias.

❖ Subsistema de frenos:

Al contrario de lo que ocurriría con el subsistema de las ruedas, Adams/Car trabaja con un solo archivo que contiene la representación y la información de todo el subsistema de frenos del vehículo. Este archivo contiene los cuatro discos de freno y permite configurar un mismo parámetro de forma diferente para los discos de freno delanteros y los traseros.

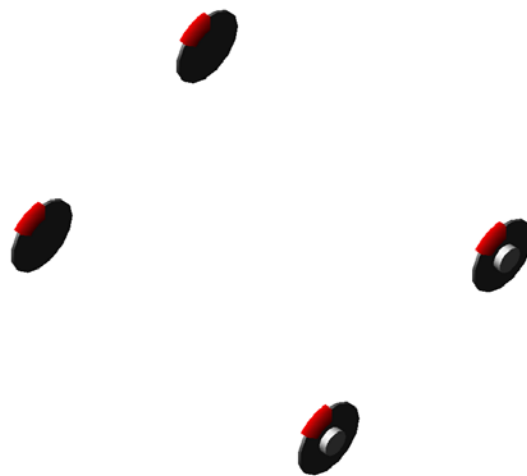


Figura 39. Modelado de los frenos.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

En cada uno de los discos de freno podemos distinguir tres partes claramente: el disco, en color gris oscuro; el cubo de la rueda, en gris claro; y la pastilla de freno, en rojo.

Los valores de las medidas referentes al disco, al cubo de la rueda y a la pastilla de freno han sido medidos directamente del disco de freno real montado en el Zytel Zero.

En la tabla 10, se muestra el valor de cada uno de los parámetros del subsistema de frenos:

FRENOS		
Parámetro	Valor	Unidad
Radio del disco	145	mm
Espesor del disco	12	mm
Anchura del cubo	30	mm
Desplazamiento del cubo	0	mm
Área de la pastilla	3827	mm ²
Reparto de frenado	0,6	
Coeficiente de rozamiento	0,4	

Tabla 10. Parámetros del subsistema de frenos.

En cuanto al valor del reparto de frenado, se ha dejado el valor por defecto de 0,6 (60%) por consejo de Zytel Automoción S.L.

Por último, el valor del coeficiente de rozamiento ha sido elegido tratando de maximizar la seguridad del vehículo. Dado que dicho coeficiente varía entre 0,3 y 0,4 dependiendo de la temperatura, presión y velocidad, se ha seleccionado el valor de 0,4 para aumentar la fricción de las pastillas con el disco y, de este modo, aumentar la fuerza y capacidad de frenado del vehículo.

❖ Subsistema de la suspensión delantera:

Como viene indicado en la ficha técnica, el Zytel Zero consta de una suspensión de tipo independiente en todas sus ruedas, concretamente una suspensión de paralelogramo deformable.

Esta suspensión es sin lugar a dudas una de las más empleadas en los vehículos turismo. Variando la longitud y orientación de los brazos, así como la posición y el tipo de anclaje, pueden obtenerse infinidad de geometrías. Es precisamente este proceso el que será llevado a cabo para crear el modelo de suspensión montado en el Zytel Zero

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

En primer lugar, debe abrirse el modelo de paralelogramo deformable de todos los modelos de suspensión disponibles en la biblioteca de Adams/Car.

En la figura 40 se distinguen claramente las partes típicas de una suspensión de paralelogramo deformable. Han sido representadas con colores diferentes para facilitar su distinción. Estas partes son: brazo inferior en color rojo, brazo superior en color azul claro, mangueta en azul oscuro, biela de unión con la dirección en color gris y el conjunto muelle-amortiguador en color amarillo y metálico.

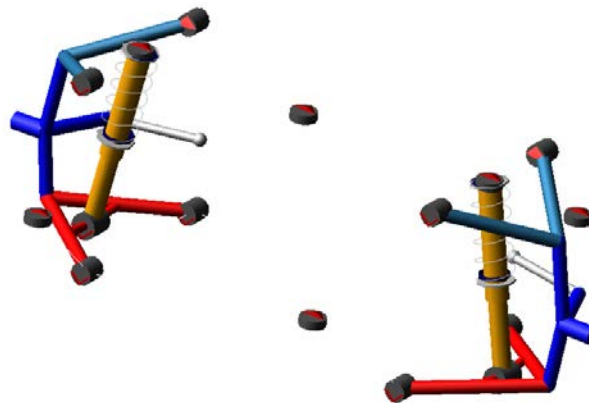


Figura 40. Modelado de la suspensión delantera.

En la tabla 11, se indican los parámetros a introducir para la configuración de la suspensión delantera:

SUSPENSIÓN DELANTERA		
Parámetro	Valor	Unidad
Ángulo convergencia	0	º
Ángulo de caída	1,25	º
Masa	45	kg
Inercia Ixx	1.98E+04	kg·mm ²
Inercia Iyy	6.70E+04	kg·mm ²
Inercia Izz	4.76E+04	kg·mm ²
Constante elástica Kd	120	N/mm
Lmuelle libre de carga	248	mm
Lmuelle instalado	248	mm
Constante amortiguador Rd	0,400	N·s/mm

Tabla 11. Parámetros del subsistema de suspensión delantera.

Estos datos se obtienen a partir de los manuales que proporciona el fabricante así como del propio Adams/car que es capaz de calcular parámetros de inercias, constantes elásticas y longitudes de muelles a partir de la geometría importada.

❖ Subsistema de la suspensión trasera:

Como ya ocurría con la suspensión delantera, la suspensión trasera del Zytel Zero también es de tipo independiente, de paralelogramo deformable concretamente. Por lo tanto, los cálculos y estimaciones necesarios para su configuración van a realizarse de forma análoga al subsistema explicado anteriormente de la suspensión delantera.

El modelo de suspensión trasera que incluye la biblioteca de Adams/Car es tan parecido al de suspensión delantera que incluso utiliza la misma plantilla. Este hecho le otorga la misma topología y geometría básica. Sin embargo, Adams/Car ofrece varias posibilidades de ajuste y modificación para asemejar esta suspensión a la real montada en el Zytel Zero

Además, como se observa en la figura 41, el subsistema de suspensión trasera no consta sólo de las partes vistas en el subsistema anterior (brazos superior e inferior, mangueta y biela de unión), sino también de una parte adicional que representa los palieres que transmitirán el movimiento del motor a las ruedas traseras del vehículo.



Figura 41. Modelado de la suspensión trasera.

Los parámetros necesarios para la configuración del subsistema son esencialmente los mismos que en el caso de la suspensión delantera, con la salvedad de los datos másicos e inerciales. La biela de unión con la dirección será eliminada y habrá de añadirse el cálculo de la masa, las inercias y el centro de gravedad de los palieres (representados en color negro).

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

En la tabla 12, se muestra los parámetros de configuración de la suspensión trasera:

SUSPENSIÓN TRASERA		
Parámetro	Valor	Unidad
Ángulo convergencia	0	º
Ángulo de caída	1,25	º
Masa	90	kg
Inercia Ixx	1.98E+04	kg·mm ²
Inercia Iyy	6.70E+04	kg·mm ²
Inercia Izz	4.76E+04	kg·mm ²
Constante elástica Kd	150	N/mm
Lmuelle libre de carga	300	mm
Lmuelle instalado	300	mm
Constante amortiguador Rd	0,308	N·s/mm

Tabla 12. Parámetros del subsistema de suspensión trasera.

Como en caso de la suspensión delantera, los datos se obtienen a partir de los manuales que proporciona el fabricante así como del propio Adams/car que es capaz de calcular parámetros de inercias, constantes elásticas y longitudes de muelles a partir de la geometría importada.

❖ Subsistema de la dirección:

El Zytel Zero monta una dirección de piñón-cremallera. En estos tipos de dirección se utiliza una cremallera que se mueve transversalmente al vehículo accionada por un piñón solidario con la columna de dirección. El conductor actúa sobre el extremo opuesto de la columna de dirección, donde está ubicado el volante. La cremallera está unida por rótulas a las bieletas de dirección que, a su vez, se articulan en las manguetas.

Este tipo de sistema de dirección se emplea en muchos de los vehículos actuales, sobre todo en suspensiones delanteras independientes. Existen diversas variantes en función de que las bieletas vayan ancladas a los extremos o al centro de la cremallera, teniendo en cuenta que el piñón puede estar situado en una posición centrada o no respecto al vehículo

En Adams/Car, tanto las manguetas como las bielas de dirección no forman parte del subsistema de dirección, sino del subsistema de suspensión delantera que se vio anteriormente.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

La figura 42 muestra el subsistema de dirección de piñón-cremallera:



Figura 42. Modelado de la dirección.

En esta imagen, se pueden diferenciar las partes básicas de la dirección: volante, en color negro; columna de dirección, en color gris claro; piñón, en color gris oscuro; cremallera, en color azul; y el alojamiento de la cremallera, en color rojo.

Los parámetros a configurar en este subsistema se muestran en la tabla 13:

DIRECCIÓN		
Parámetro	Valor	Unidad
Masa	12,61	kg
Inercia Ixx	6.93E+06	kg·mm ²
Inercia Iyy	1.26E+07	kg·mm ²
Inercia Izz	8.53E+06	kg·mm ²
nvolante/columna dirección	1	
ncolumna de dirección/piñón	1	
npiñón/cremallera	0,1745	º/mm
Desplazamiento cremallera máx	100	mm
Fuerza cremallera máx.	10000	N
Ángulo de giro máximo	720	º
Par de giro máximo	60000	N·mm

Tabla 13. Parámetros del subsistema de la dirección.

Al resultar imposible realizar mediciones de la dirección o acceder a información en referencia a la misma, los datos anteriores se han aproximado por los datos por defecto de Adams/Car para una dirección de piñón-cremallera. A la hora de tomar esta decisión se ha valorado la influencia futura en los resultados de simulación considerándose mínima dicha influencia tras estudiar otros casos de simulación y la información de ayuda que proporciona el propio software.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

❖ Subsistema del motor eléctrico:

El Zytel Zero es un vehículo eléctrico puro ya que el único motor que lo impulsa es un motor eléctrico de corriente continua tipo Brushless. Sin embargo, Adams/Car no trabaja con motores eléctricos sino con motores de combustión interna.

Por tanto, será necesario configurar el motor existente en la biblioteca del programa de manera que su comportamiento se asemeje lo más posible al de un motor eléctrico, cuyas características son radicalmente diferentes.

De no modificar el motor de Adams/Car adecuadamente, las simulaciones llevadas a cabo no tendrían ningún valor. En la figura 43, se representa el motor exactamente como está montado en el prototipo real del Zytel Zero.



Figura 43. Motor DC Brushless montado en el Zytel Zero.

Por el contrario, el motor que encontramos en la biblioteca del programa, de combustión interna como ya se ha mencionado, está representado como se muestra en la figura 44.

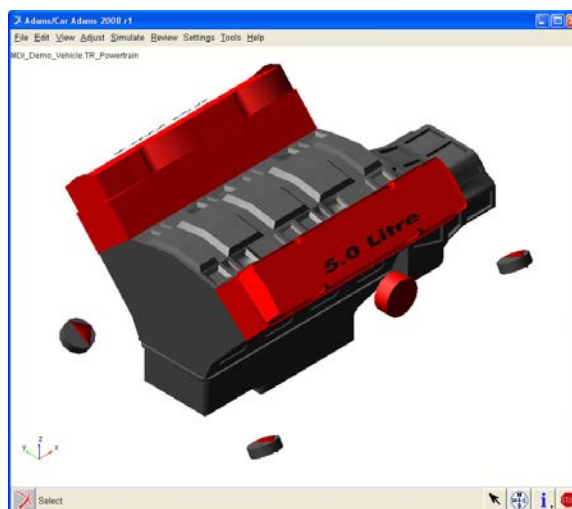


Figura 44. Motor de combustión interna de la biblioteca de Adams/Car

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

El primer paso a realizar será entonces la sustitución de este modelo gráfico por el modelo del motor eléctrico.

La única parte que debe ser conservada es el diferencial, representado por dos cilindros de color rojo (en la figura 45 sólo se observa uno de ellos), que irán unidos a los palieres de las ruedas traseras.

A continuación, se importa el archivo tipo Parasolid con la representación del nuevo motor y se modifica su apariencia dotándolo de un color que permita distinguirlo de entre todos los subsistemas restantes. En la figura 45 se muestra el modelo del nuevo motor eléctrico que impulsará el modelo del Zytel Zero.

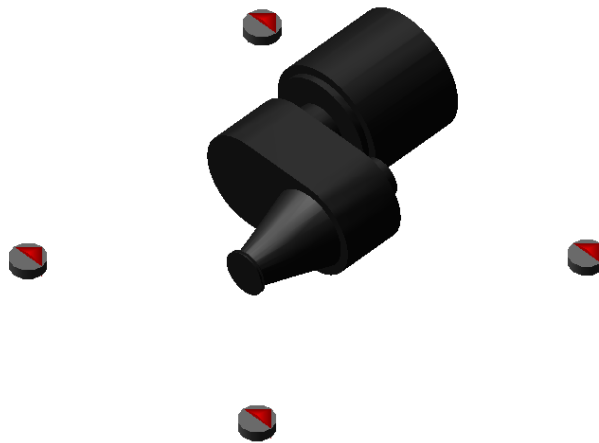


Figura 45. Modelado del motor eléctrico.

Ahora ya puede procederse a la configuración inicial del motor, que se realizará asignando valores a los parámetros siguientes:

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

MOTOR ELÉCTRICO		
Parámetro	Valor	Unidad
$n_{ralenti}$	0	rpm
n_{max}	8000	rpm
n° marchas	1	
r marcha primera	1,41	
r marcha atrás	1,41	
Ganancia EMS	0,005	
Aceleración máxima EMS	100	%
Aceleración nula EMS	1	%
J_{motor}	32300	kg·mm ²
T_{max} embrague	1.00E+06	N·mm
$C_{embrague}$	1.00E+06	N·mm·s/ ^o
$K_{embrague}$	1.00E+08	N·mm/ ^o
$T_{embrague}$	0,005	s
Punto 100% embragado	0,99	
Punto 100% desembragado	1	
$T_{nominal}$	250000	N·mm
T_{pico}	400000	N·mm
Masa	100	kg
Inercia I_{xx}	749755	kg·mm ²
Inercia I_{yy}	809877	kg·mm ²
Inercia I_{zz}	711755	kg·mm ²

Tabla 14. Parámetros del subsistema del motor eléctrico.

Como queda constatado, la configuración del subsistema del motor es complicada, ya que requiere de un gran número de datos. Por otro lado, esto también permite que el modelo de motor tenga una gran similitud con el real, algo muy importante ya que el motor será el responsable de buena parte del comportamiento dinámico del vehículo.

Al no poder acceder al conjunto del diferencial ni conocer su fabricante se ha decidido no modificarlo y, por ello, la curva RPM-Par característica del diferencial es la curva por defecto incluida en Adams/Car.

Por el contrario, gracias a la información proporcionada por el fabricante UQM, se conocen: la velocidad del motor al ralenti (0 rpm), la velocidad límite del motor (8000 rpm), el número de marchas (1, ya que se trata de un vehículo eléctrico puro sin caja de cambios ni embrague), la relación de la marcha primera (1,41), la relación de la marcha atrás (-1,41).

Los parámetros relacionados con las inercias del motor, se obtienen a partir del modelo de CAD del motor eléctrico.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

Para conseguir una simulación que nos proporcione una información veraz y ajustada a la realidad, es imprescindible introducir en la configuración del motor eléctrico en Adams/Car la curva del par-motor respecto la velocidad de giro. A partir de dicha curva, el software calcula la curva de la potencia suministrada por el motor respecto la velocidad de giro.

Además, el programa permite introducir una tercera variable junto al par-motor y la velocidad de giro que es el nivel de carga del motor. Se define de 0 a 1 siendo 0 el acelerador sin pisar y 1 el acelerador pisado a fondo. A partir de distintos valores para cada nivel de carga se genera el denominado mapa motor. En el presente caso, se ha optado, para simplificar la primera simulación, por introducir la curva par-motor/giro motor con un único grado de carga de valor 1. Con lo cual no se obtiene una superficie sino solamente una curva que puede verse en la figura 46:

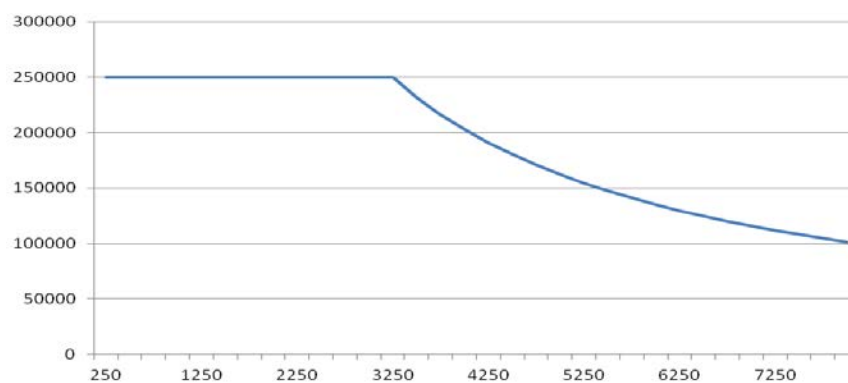


Figura 46. Curva Par motor(N-mm) – Velocidad de giro (rpm).

A partir de esta curva puede obtenerse la curva correspondiente a la potencia suministrada por el motor respecto de la velocidad de giro para un nivel de carga 1. En la figura 47, se observa el resultado:

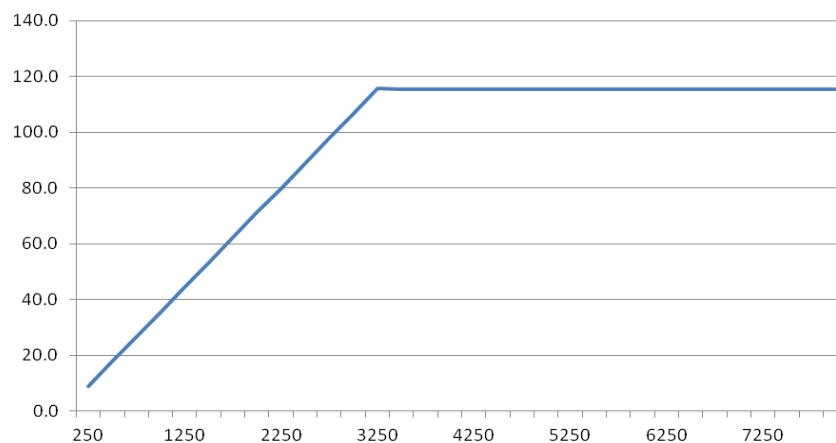


Figura 47. Curva de Potencia (CV) - Velocidad de giro (rpm).

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

❖ Subsistema del chasis:

El subsistema del chasis es uno de los más sencillos de crear y configurar. Únicamente se debe importar el archivo de tipo Parasolid con la geometría del Zytel que fue creado al comienzo de la construcción del modelo. El resultado de este proceso se muestra en la figura 48:



Figura 48. Modelado del chasis.

Se ha dotado a este subsistema de cierto grado de transparencia para poder apreciar algunos de los sólidos de su interior, como las baterías o el bastidor. La configuración del chasis resulta sencilla ya que únicamente requiere el cálculo de los siguientes parámetros:

CHASIS		
Parámetro	Valor	Unidad
Masa	2340	kg
Inercia Ixx	3.65E+08	kg·mm ²
Inercia Iyy	1.43E+08	kg·mm ²
Inercia Izz	3.25E+08	kg·mm ²
Xcdg	1444	mm
Ycdg	0	mm
Zcdg	729	mm
Coefficiente aerodinámico	0,35	
Área frontal	2616914	mm ²

Tabla 15. Parámetros del subsistema del chasis.

3. MODELADO DE LA ARQUITECTURA DEL ZYTEL ZERO

El cálculo de la masa de y del centro de gravedad del chasis así como de las inercias correspondientes ha sido realizado mediante la herramienta de cálculo de que consta Adams/Car ya que se busca una mayor exactitud debido a que influirá de manera decisiva en el comportamiento dinámico del vehículo. Se ha considerado el chasis con todos los módulos de batería cargados lo que supone un total de 670 kg de los 2340 kg asignados al chasis. En el capítulo relativo a la simulación del vehículo se ahondará en esta circunstancia.

El coeficiente aerodinámico de los vehículos actuales varía entre 0,3 y 0,35. En el caso del Zytel Zero, al no poder acceder a esta información se ha considerado el caso más desfavorable, por tanto, el coeficiente será de 0,35.

4. Modelado del trayecto en Adams/Car.

Adams/Car permite el modelado del trayecto en 3D en cual se quiere realizar la simulación del vehículo. En su biblioteca de contenidos, el software contiene una serie de ejemplos tanto de trayectos cerrados, generalmente circuitos que permiten obtener una gran cantidad de información sobre el vehículo en la simulación, como de trayectos abiertos, cuya finalidad es simular determinadas maniobras (obstáculos de nivel, rampas, cambios bruscos de dirección, frenado o aceleración en curva, etc.) con el objetivo de conocer el comportamiento dinámico del vehículo en dichas circunstancias. Las simulaciones en trayectos cerrados requieren generalmente de un mayor coste computacional por lo que la utilidad del uso de trayectos abiertos gana enteros cuando lo que se busca es conocer una información determinada de una maniobra determinada con el menor tiempo de cálculo posible.

En la siguiente imagen pueden verse ejemplos de los circuitos (trayectos cerrados) existentes en la biblioteca de contenidos de Adams/Car:

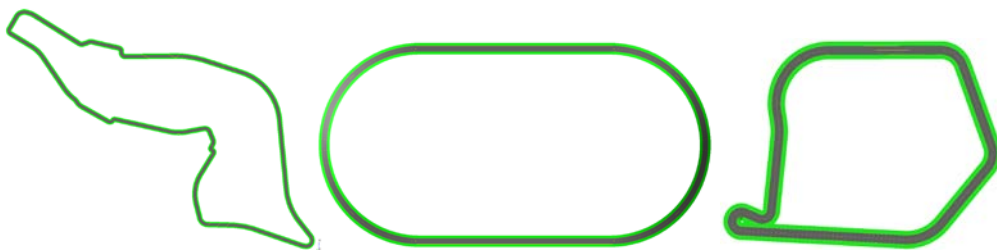


Figura 49. Circuitos cerrados en Adams/Car.

Por otra parte, en la figura 50 se muestra un ejemplo de trayectos abierto de una recta que permite realizar simulaciones con el objetivo de conseguir información acerca de la aceleración o frenado de un vehículo:



Figura 50. Trayecto abierto en Adams/Car.

El modelado de estos trayectos, ya sean abiertos o cerrados, puede realizarse mediante puntos o mediante tramos. En los siguientes apartados se describen ambos métodos.

4.1 Modelización por puntos.

La creación de modelos de carreteras en Adams/Car se realiza con la herramienta Road Builder. Al iniciar esta aplicación aparece una ventana de trabajo como la mostrada en la figura 51.

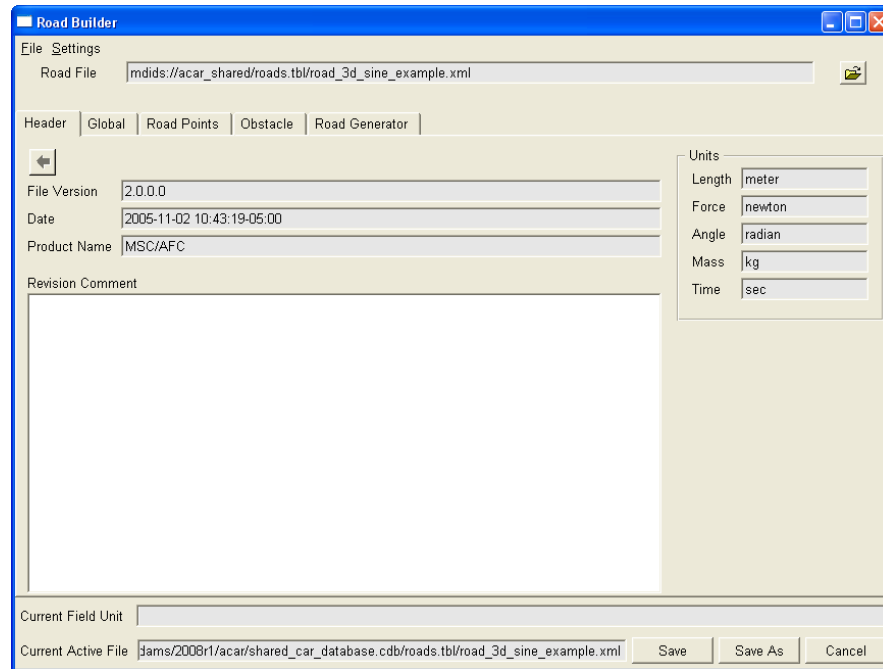


Figura 51. Ventana de trabajo de Road Builder.

Dentro de esta ventana de trabajo, las dos pestañas más importantes para la creación de nuestro modelo de circuito son: Road Generator, que permite crear tramos de carreteras a partir de unas condiciones iniciales impuestas; y Road Points, que almacena todos los datos de cada punto de la carretera en forma de tabla.

En la figura x se muestra esta última pestaña más detalladamente. En la tabla que se observa cada una de las filas corresponde a un solo punto de la carretera y cada una de las columnas detalla un parámetro concreto de cada punto:

- ✓ **Number:** número del punto de la carretera.
- ✓ **X:** posición relativa en metros del punto respecto al origen en el eje x.
- ✓ **Y:** posición relativa en metros del punto respecto al origen en el eje y.
- ✓ **Z:** posición relativa en metros del punto respecto al origen en el eje z, altitud respecto al origen.
- ✓ **Width:** anchura en metros de la carretera en dicho punto.

4. MODELADO DEL TRAYECTO EN ADAMS/CAR

- ✓ **Bank:** peralte en grados de la carretera en dicho punto.
- ✓ **Friction Left:** coeficiente de fricción de la parte izquierda de la carretera en dicho punto.
- ✓ **Friction Right:** coeficiente de fricción de la parte derecha de la carretera en dicho punto.

En la figura 52, se muestra la pantalla relativa a la herramienta Road Builder:

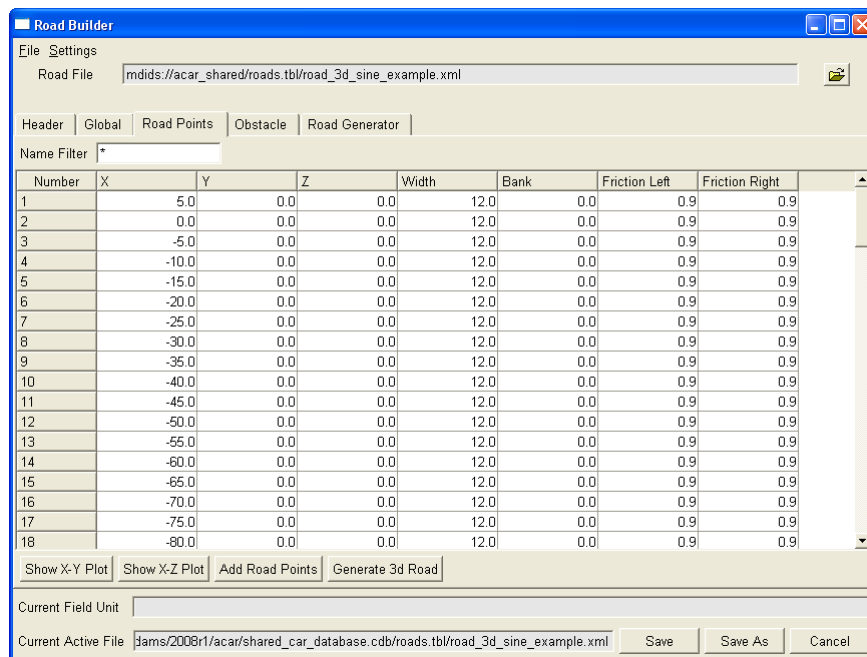


Figura 52. Pestaña Road Points de Road Builder.

4.2 Modelización por tramos.

Dado que detallar todos estos datos de cada uno de los puntos del trayecto sería demasiado lento y laborioso, puede acudir a la pestaña Road Generator mencionada anteriormente y que permite construir el modelo de carretera a base de añadir tramos con las especificaciones que se deseen. En la figura 53 podemos un ejemplo de modelización de trayectos por partes:

4. MODELADO DEL TRAYECTO EN ADAMS/CAR

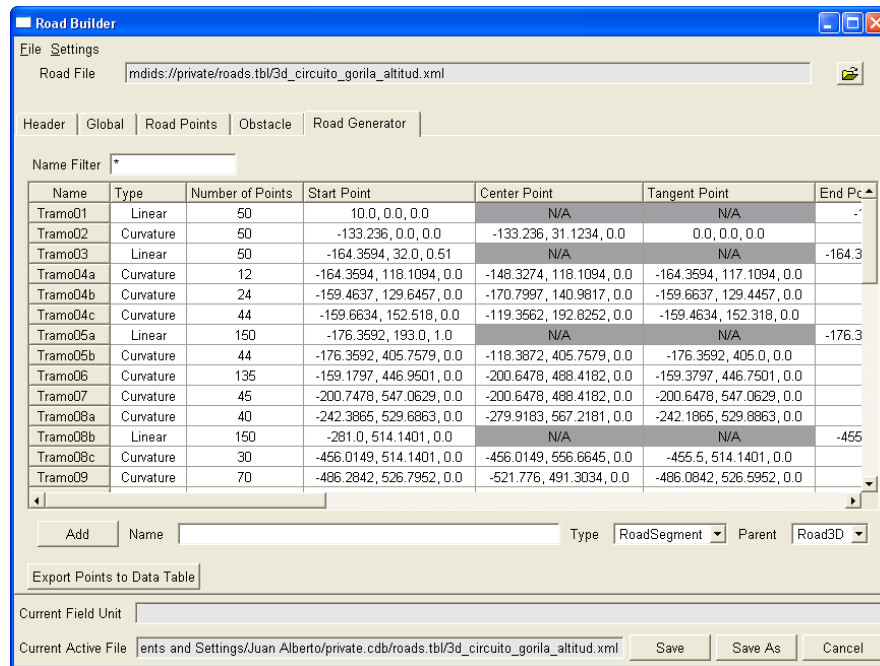


Figura 53. Pestaña Road Generator de Road Builder.

De esta forma es posible simplificar la construcción del modelo dividiendo el trayecto en tramos rectos y curvos configurando cada uno de forma que se aproximen lo más posible al trayecto real. Para configurar los tramos rectos sólo se necesitan los puntos inicial y final así como el número deseado de puntos que formen ese tramo, su anchura, su peralte y su coeficiente de fricción. A la configuración de los tramos curvos hay que añadir a los mencionados el radio de curvatura y la longitud del arco. Una vez introducidos estos datos o condiciones de contorno, Adams/Car añade automáticamente a la tabla descrita anteriormente tantos puntos como los especificados en el tramo, cada uno con sus respectivas coordenadas y parámetros.

5. Simulación del vehículo mediante Adams/Car.

En este capítulo, se describe como se lleva a cabo la simulación del modelo. En primer lugar, hay que definir cuáles son los objetivos de la simulación y como se va a llevar a cabo dicho proceso para obtener la información deseada.

En el presente TFM, el objetivo de la simulación es conocer cuáles son las variables más influyentes en el vehículo desde el punto de vista energético dada la naturaleza eléctrica del mismo. Estas variables son fundamentalmente: el peso del vehículo asociado a la masa de baterías cargada, el comportamiento del motor cuyas prestaciones están también relacionadas con la masa de baterías presentes y conectadas así como la influencia del trazado representada en forma de pendientes en el consumo energético final. A continuación, se desarrolla como se han establecido cada una de las configuraciones del vehículo así como se ha determinado las características del trazado y del ciclo de conducción elegido.

5.1 Configuraciones peso-motor del vehículo.

La masa de un vehículo es una variable de enorme influencia en el consumo energético del mismo. En el caso de los vehículos eléctricos adquiere una mayor trascendencia al estar directamente relacionada con el número de módulos de batería cargados en el vehículo con lo cual se entra en la espiral que se muestra en la figura 54.

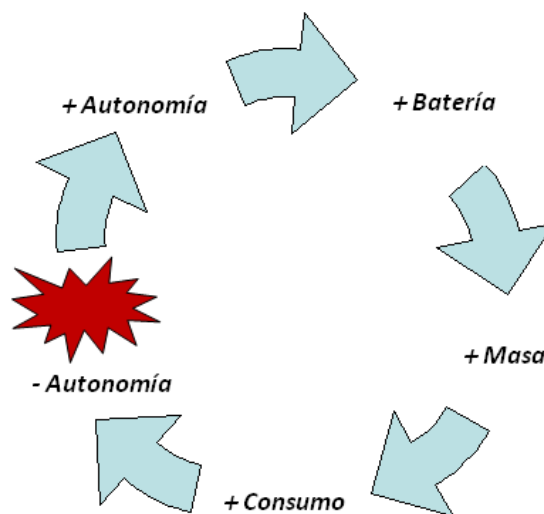


Figura 54. Problemática entre masa de batería y autonomía en vehículos eléctricos.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

Esta circunstancia derivada de la necesidad de almacenar la energía eléctrica en dispositivos cuya masa es elevada obliga a encontrar un punto de óptimo de masa de baterías cargada en función de la autonomía prevista para un recorrido determinado.

En el caso que nos ocupa, el Zytel Zero está diseñado con capacidad para almacenar 120 módulos de batería repartidos en diferentes ubicaciones del vehículo lo que supone una masa de batería de 670 kg y una masa total del vehículo de 2700 kg. Por otra parte, estos 120 módulos de batería son capaces de suministrar unos 400V de tensión nominal y alimentar al motor con una intensidad máxima de 500 A los que permite al motor eléctrico funcionar a unas prestaciones muy altas en cuanto a potencia y par-motor suministrado. Unas prestaciones que se alejan de los vehículos eléctricos típicos y lo acercan a los vehículos de combustión interna tradicionales.

Además, la arquitectura del Zytel Zero permite la desconexión y extracciones de los módulos de batería ubicados en diversas zonas del vehículo. Es decir, se puede reducir significativamente la masa de batería cargada. En consecuencia, las variables eléctricas de suministro del nuevo conjunto de batería sufrirán un descenso en sus valores por lo que las prestaciones del motor eléctrico disminuirán.

A continuación, se presentan tres configuraciones de masa batería-motor que se van a simular para conocer su comportamiento energético.

❖ Configuración A:

La primera configuración, a la que se denominará configuración A, se empleará para simular el comportamiento del vehículo con la máxima carga de baterías colocadas en las distintas ubicaciones y conectados todos los módulos presentes. Es decir, el motor eléctrico trabajará en un rango de tensión de 400V para que sea capaz de suministrar las máximas prestaciones en cuanto a potencia y par-motor entregado.

En resumen, la configuración A de peso-motor se resume en la tabla 16:

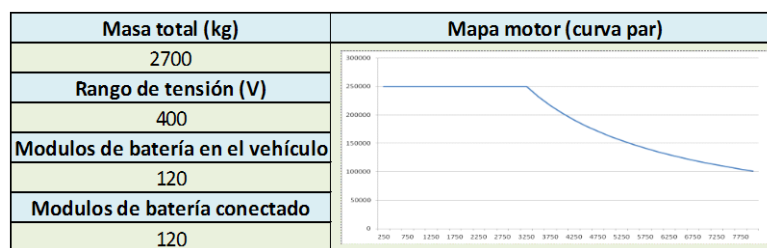


Tabla 16. Configuración A de peso-motor.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

En el modelo virtual creado para la simulación hay que comprobar que el valor de masa total del vehículo es correcto realizando la suma de la masa de los distintos subsistemas.

Masa ruedas (kg)	112
Masa motor (kg)	100
Masa dirección (kg)	13
Masa suspensiones (kg)	135
Masa chasis (kg)	1670
Masa baterías (kg)	670
Masa total (kg)	2700

Tabla 17. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración A.

Por su parte, el mapa motor correspondiente a este caso debe introducirse en el archivo de propiedades del motor eléctrico.

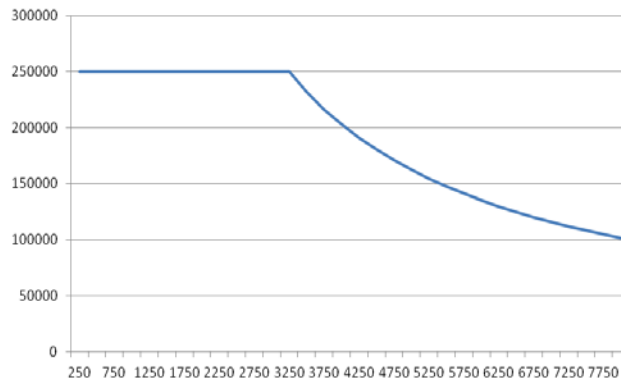


Figura 55. Curva par motor (N·mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración A.

Para ello, se emplea el archivo de propiedades modificable mediante un editor de textos:

```

Mapa_motor_400V - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
=====MDI_HEADER=====
[MDI_HEADER]
FILE_TYPE = 'pwr'
FILE_VERSION = 1.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
=====UNITS=====
[UNITS]
(BASE)
{length force angle mass time}
{mm newton degrees kg sec}
(USE)
{unit_type length force angle mass time conversion}
{rpm 0 0 1 0 -1 6.0}
=====ENGINE=====
[ENGINE]
(C_DATA)
{throttle}
0.0
1.00
(CV_DATA)
{engine_speed <rpm> torque throttle <torque>}
0 0
250 -250000 250000
500 -250000 250000
750 -250000 250000
1000 -250000 250000
1250 -250000 250000
1500 -250000 250000
1750 -250000 250000
2000 -250000 250000
2250 -250000 250000
2500 -250000 250000
2750 -250000 250000
3000 -250000 250000
3250 -250000 250000
3500 -231929 231929
3750 -216467 216467
4000 -202928 202928
4250 -191000 191000
4500 -180389 180389
4750 -170895 170895
5000 -162350 162350
5250 -154601 154601
5500 -147591 147591
5750 -141174 141174
6000 -135292 135292
6250 -129880 129880
6500 -124885 124885
6750 -120259 120259
7000 -115964 115964
7250 -111966 111966
7500 -108233 108233
7750 -104742 104742
8000 -101469 101469

```

Figura 56. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración A.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

Tras estas verificaciones y sus correspondientes modificaciones, el modelo del Zytel Zero ya está listo para ser simulado en las condiciones impuestas por la configuración A.

❖ Configuración B:

La segunda configuración, a la que se denominará B, se empleará para simular el comportamiento del vehículo en condición de tensión mínima de funcionamiento situada en los 250V. Es decir, se configurará el vehículo con el número de módulos suficientes para alcanzar dicha tensión mínima de funcionamiento. Aquellos módulos excedentes se retiraran con la consiguiente disminución de la masa total del coche.

Por su parte, el hecho de trabajar en la configuración de mínima tensión hará que las prestaciones que ofrezca el motor en cuanto a potencia y par-motor sean menores.

En la siguiente tabla 18, se resumen las condiciones de funcionamiento de la configuración B:

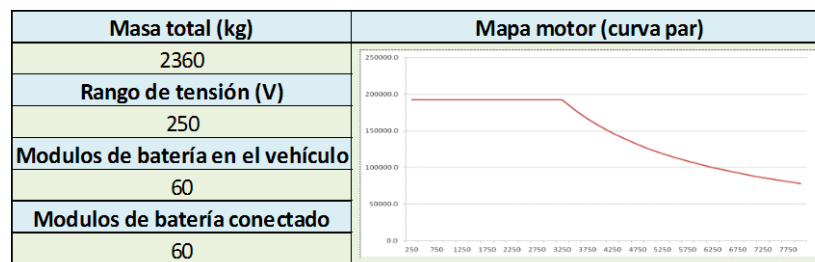


Tabla 18. Configuración B de peso-motor.

Como en el caso anterior, hay que comprobar en el modelo virtual creado para la simulación que el valor de masa total del vehículo introducido en los parámetros es correcto si se realiza la suma de la masa de los distintos subsistemas.

Masa ruedas (kg)	112
Masa motor (kg)	100
Masa dirección (kg)	13
Masa suspensiones (kg)	135
Masa chasis (kg)	1670
Masa baterías (kg)	330
Masa total (kg)	2360

Tabla 19. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración B.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

Por su parte, el mapa motor correspondiente a esta configuración de baterías debe introducirse en el archivo de propiedades del motor eléctrico como en el caso anterior.

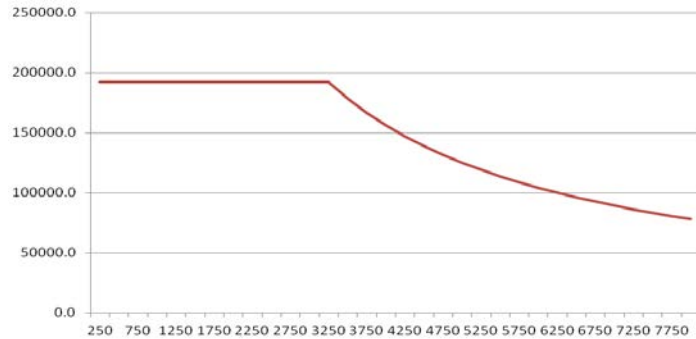


Figura 57. Curva par motor (N·mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración B.

Para ello, se modifica el archivo de propiedades del mapa motor mediante un editor de textos:

```
Mapa_motor_750W - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADERS]
FILE_TYPE = 'pwr'
FILE_VERSION = 1.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
$-----UNITS
[UNITS]
(BASES)
length force angle mass time
mm newton degrees kg sec
(USES)
unit_type length force angle mass time conversion
rpm 0 1 0 0 -1 6.0
$-----ENGINE
[ENGINE]
Z_DATA
(throttle)
0.0
1.00
(XY_DATA)
(engine_speed <rpm> torque@throttle <torque>)
0 0
250.0 -192307.7 192307.7
300.0 -192307.7 192307.7
750.0 -192307.7 192307.7
1000.0 -192307.7 192307.7
1250.0 -192307.7 192307.7
1500.0 -192307.7 192307.7
1750.0 -192307.7 192307.7
2000.0 -192307.7 192307.7
2250.0 -192307.7 192307.7
2500.0 -192307.7 192307.7
2750.0 -192307.7 192307.7
3000.0 -192307.7 192307.7
3250.0 -192307.7 192307.7
3500.0 -178406.9 178406.9
3750.0 -164513.1 164513.1
4000.0 -156106.2 156106.2
4250.0 -146923.1 146923.1
4500.0 -138760.8 138760.8
4750.0 -131457.7 131457.7
5000.0 -124884.6 124884.6
5250.0 -118997.7 118997.7
5500.0 -113531.5 113531.5
5750.0 -108595.4 108595.4
6000.0 -104070.8 104070.8
6250.0 -99907.7 99907.7
6500.0 -96065.4 96065.4
6750.0 -92506.9 92506.9
7000.0 -89203.1 89203.1
7250.0 -86127.7 86127.7
7500.0 -83156.2 83156.2
7750.0 -80570.8 80570.8
8000.0 -78053.1 78053.1
```

Figura 58. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración B.

Tras realizar estas verificaciones y sus correspondientes modificaciones, el modelo del Zytel Zero ya está listo para ser simulado en las condiciones impuestas por la configuración B.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

❖ Configuración C:

La tercera y última configuración que se plantea, denominada configuración C, representa una situación intermedia de las situaciones vistas en las dos configuraciones anteriores. Consistirá en simular el vehículo con la carga máxima de batería pero solamente se hallarán conectadas las mínimas necesarias para que funcione el motor en condiciones de tensión mínima a 250V.

A priori, parece una configuración poco lógica y acertada debido a que la penalización de peso que supone la carga de todos los módulos de batería se desaprovecha al no contar con la tensión de funcionamiento máxima de 400V que puede llegarse a suministrar con las consecuentes prestaciones mejoradas que presentaría el motor eléctrico frente a las que exhibe a 250V.

La razón fundamental de llevar a cabo esta simulación de esta configuración reside en el hecho de que para desmontar los módulos de batería que no van a ser conectados se necesita un cierto tiempo considerable así como un personal cualificado para ello. Podría darse esta situación en una flota de vehículos idénticos al Zytel Zero para distribución urbana de mercancías (DUM) donde no resulta admisible la pérdida de tiempo necesaria para la extracción de los módulos de batería. Además, un menor número de dichos módulos supondría un menor tiempo de recarga de energía frente a la recarga de la totalidad de ellos.

Es por ello que es necesario realizar la simulación de la configuración C para conocer cuál es el comportamiento del vehículo en lo que serían las condiciones más desfavorables de peso-motor y comparar los resultados frente a las dos configuraciones anteriores. En la tabla 20, se resume las condiciones de funcionamiento de la configuración C:

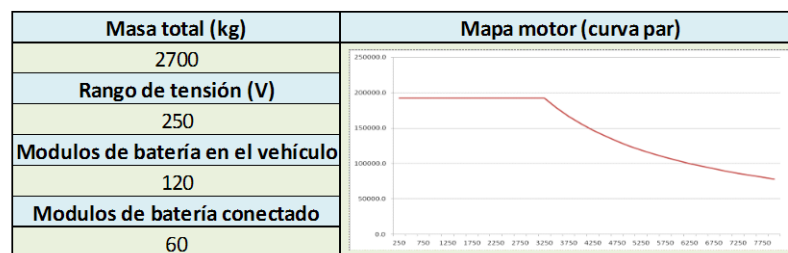


Tabla 20. Configuración C de peso-motor.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

Al igual que en las dos configuraciones anteriores, debe generarse el archivo de ensamblaje del modelo con los correctos parámetros de masa total y curva de par motor. En primer lugar, se comprueba la masa total de esta configuración:

Masa ruedas (kg)	112
Masa motor (kg)	100
Masa dirección (kg)	13
Masa suspensiones (kg)	135
Masa chasis (kg)	1670
Masa baterías (kg)	670
Masa total (kg)	2700

Tabla 21. Cálculo de masa total del vehículo para la configuración C.

El mapa motor correspondiente a esta configuración de baterías conectadas debe introducirse en el archivo de propiedades del motor eléctrico como en los casos anteriores.

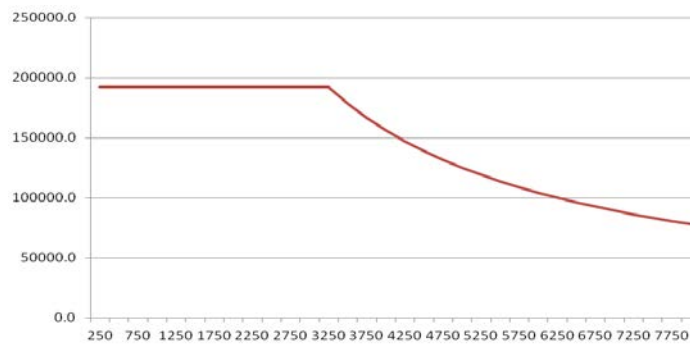


Figura 59. Curva par motor (N-mm) – Velocidad del motor (rpm) en la configuración C.

Y para ello, se modifica el archivo de propiedades del mapa motor mediante un editor de textos:

```

Mapa_motor_750V - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
-----MDI_HEADER
$
[MDI_HEADERS]
FILE_TYPE = 'pwr'
FILE_VERSION = 2.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
$
[UNITS]
(BASE)
length force angle mass time
mm newton degrees kg sec
(USER)
unit_type length force angle mass time conversion
rpm 0 0 0 -1 6.0
$
[ENGINE]
(Z_DATA)
(throttle)
0.0
1.00
(XY_DATA)
(engine_speed <rpm> torque<throttle <torque>)
0 0
50.0 -192307.7 192307.7
100.0 -192307.7 192307.7
150.0 -192307.7 192307.7
200.0 -192307.7 192307.7
250.0 -192307.7 192307.7
300.0 -192307.7 192307.7
350.0 -192307.7 192307.7
400.0 -192307.7 192307.7
450.0 -192307.7 192307.7
500.0 -192307.7 192307.7
550.0 -192307.7 192307.7
600.0 -192307.7 192307.7
650.0 -192307.7 192307.7
700.0 -192307.7 192307.7
750.0 -192307.7 192307.7
800.0 -192307.7 192307.7
850.0 -192307.7 192307.7
900.0 -192307.7 192307.7
950.0 -192307.7 192307.7
1000.0 -192307.7 192307.7
1050.0 -192307.7 192307.7
1100.0 -192307.7 192307.7
1150.0 -192307.7 192307.7
1200.0 -192307.7 192307.7
1250.0 -192307.7 192307.7
1300.0 -192307.7 192307.7
1350.0 -192307.7 192307.7
1400.0 -192307.7 192307.7
1450.0 -192307.7 192307.7
1500.0 -192307.7 192307.7
1550.0 -192307.7 192307.7
1600.0 -192307.7 192307.7
1650.0 -192307.7 192307.7
1700.0 -192307.7 192307.7
1750.0 -192307.7 192307.7
1800.0 -192307.7 192307.7
1850.0 -192307.7 192307.7
1900.0 -192307.7 192307.7
1950.0 -192307.7 192307.7
2000.0 -192307.7 192307.7
2050.0 -192307.7 192307.7
2100.0 -192307.7 192307.7
2150.0 -192307.7 192307.7
2200.0 -192307.7 192307.7
2250.0 -192307.7 192307.7
2300.0 -192307.7 192307.7
2350.0 -192307.7 192307.7
2400.0 -192307.7 192307.7
2450.0 -192307.7 192307.7
2500.0 -192307.7 192307.7
2550.0 -192307.7 192307.7
2600.0 -192307.7 192307.7
2650.0 -192307.7 192307.7
2700.0 -192307.7 192307.7
2750.0 -192307.7 192307.7
2800.0 -192307.7 192307.7
2850.0 -192307.7 192307.7
2900.0 -192307.7 192307.7
2950.0 -192307.7 192307.7
3000.0 -192307.7 192307.7
3050.0 -192307.7 192307.7
3100.0 -192307.7 192307.7
3150.0 -192307.7 192307.7
3200.0 -192307.7 192307.7
3250.0 -192307.7 192307.7
3300.0 -192307.7 192307.7
3350.0 -192307.7 192307.7
3400.0 -192307.7 192307.7
3450.0 -192307.7 192307.7
3500.0 -192307.7 192307.7
3550.0 -192307.7 192307.7
3600.0 -192307.7 192307.7
3650.0 -192307.7 192307.7
3700.0 -192307.7 192307.7
3750.0 -192307.7 192307.7
3800.0 -192307.7 192307.7
3850.0 -192307.7 192307.7
3900.0 -192307.7 192307.7
3950.0 -192307.7 192307.7
4000.0 -192307.7 192307.7
4050.0 -192307.7 192307.7
4100.0 -192307.7 192307.7
4150.0 -192307.7 192307.7
4200.0 -192307.7 192307.7
4250.0 -192307.7 192307.7
4300.0 -192307.7 192307.7
4350.0 -192307.7 192307.7
4400.0 -192307.7 192307.7
4450.0 -192307.7 192307.7
4500.0 -192307.7 192307.7
4550.0 -192307.7 192307.7
4600.0 -192307.7 192307.7
4650.0 -192307.7 192307.7
4700.0 -192307.7 192307.7
4750.0 -192307.7 192307.7
4800.0 -192307.7 192307.7
4850.0 -192307.7 192307.7
4900.0 -192307.7 192307.7
4950.0 -192307.7 192307.7
5000.0 -192307.7 192307.7
5050.0 -192307.7 192307.7
5100.0 -192307.7 192307.7
5150.0 -192307.7 192307.7
5200.0 -192307.7 192307.7
5250.0 -192307.7 192307.7
5300.0 -192307.7 192307.7
5350.0 -192307.7 192307.7
5400.0 -192307.7 192307.7
5450.0 -192307.7 192307.7
5500.0 -192307.7 192307.7
5550.0 -192307.7 192307.7
5600.0 -192307.7 192307.7
5650.0 -192307.7 192307.7
5700.0 -192307.7 192307.7
5750.0 -192307.7 192307.7
5800.0 -192307.7 192307.7
5850.0 -192307.7 192307.7
5900.0 -192307.7 192307.7
5950.0 -192307.7 192307.7
6000.0 -192307.7 192307.7
6050.0 -192307.7 192307.7
6100.0 -192307.7 192307.7
6150.0 -192307.7 192307.7
6200.0 -192307.7 192307.7
6250.0 -192307.7 192307.7
6300.0 -192307.7 192307.7
6350.0 -192307.7 192307.7
6400.0 -192307.7 192307.7
6450.0 -192307.7 192307.7
6500.0 -192307.7 192307.7
6550.0 -192307.7 192307.7
6600.0 -192307.7 192307.7
6650.0 -192307.7 192307.7
6700.0 -192307.7 192307.7
6750.0 -192307.7 192307.7
6800.0 -192307.7 192307.7
6850.0 -192307.7 192307.7
6900.0 -192307.7 192307.7
6950.0 -192307.7 192307.7
7000.0 -192307.7 192307.7
7050.0 -192307.7 192307.7
7100.0 -192307.7 192307.7
7150.0 -192307.7 192307.7
7200.0 -192307.7 192307.7
7250.0 -192307.7 192307.7
7300.0 -192307.7 192307.7
7350.0 -192307.7 192307.7
7400.0 -192307.7 192307.7
7450.0 -192307.7 192307.7
7500.0 -192307.7 192307.7
7550.0 -192307.7 192307.7
7600.0 -192307.7 192307.7
7650.0 -192307.7 192307.7
7700.0 -192307.7 192307.7
7750.0 -192307.7 192307.7
7800.0 -192307.7 192307.7
7850.0 -192307.7 192307.7
7900.0 -192307.7 192307.7
7950.0 -192307.7 192307.7
8000.0 -192307.7 192307.7
8050.0 -192307.7 192307.7
8100.0 -192307.7 192307.7
8150.0 -192307.7 192307.7
8200.0 -192307.7 192307.7
8250.0 -192307.7 192307.7
8300.0 -192307.7 192307.7
8350.0 -192307.7 192307.7
8400.0 -192307.7 192307.7
8450.0 -192307.7 192307.7
8500.0 -192307.7 192307.7
8550.0 -192307.7 192307.7
8600.0 -192307.7 192307.7
8650.0 -192307.7 192307.7
8700.0 -192307.7 192307.7
8750.0 -192307.7 192307.7
8800.0 -192307.7 192307.7
8850.0 -192307.7 192307.7
8900.0 -192307.7 192307.7
8950.0 -192307.7 192307.7
9000.0 -192307.7 192307.7
9050.0 -192307.7 192307.7
9100.0 -192307.7 192307.7
9150.0 -192307.7 192307.7
9200.0 -192307.7 192307.7
9250.0 -192307.7 192307.7
9300.0 -192307.7 192307.7
9350.0 -192307.7 192307.7
9400.0 -192307.7 192307.7
9450.0 -192307.7 192307.7
9500.0 -192307.7 192307.7
9550.0 -192307.7 192307.7
9600.0 -192307.7 192307.7
9650.0 -192307.7 192307.7
9700.0 -192307.7 192307.7
9750.0 -192307.7 192307.7
9800.0 -192307.7 192307.7
9850.0 -192307.7 192307.7
9900.0 -192307.7 192307.7
9950.0 -192307.7 192307.7
10000.0 -192307.7 192307.7

```

Figura 60. Archivo de propiedades del motor eléctrico para la configuración C.

Finalmente, tras llevar a cabo estas verificaciones y sus correspondientes modificaciones, el modelo del Zytel Zero ya está listo para ser simulado en las condiciones impuestas por la configuración C.

5.2 Elección del ciclo de conducción y configuración del trazado.

Una vez establecidas las configuraciones de peso-motor que se van a simular, debe procederse a definir el ciclo de conducción que se empleará así como las características del trazado virtual a recorrer durante dicho ciclo.

❖ Elección del ciclo de conducción:

Adams/Car permite a través de archivos DCD programar variables como la velocidad, la aceleración o el ángulo de giro de la dirección del volante en función del tiempo o de la distancia recorrida.

En la presente simulación se ha optado por configurar el movimiento del vehículo a través de la velocidad de desplazamiento frente al tiempo. La razón que sustenta dicha decisión es que va a emplearse un ciclo de conducción similar a los que se emplean para conocer los consumos energéticos y emisiones contaminantes de los vehículos de combustión interna tradicionales.

El ciclo empleado en la simulación será prácticamente igual al ciclo NEDC. El “New European Driving Cycle” NEDC es un ciclo de conducción que consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extra-urbano (Extra-Urban driving cycle EUDC). Es una prueba diseñada para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles y está orientada a informar a los consumidores. Las pruebas se basan en la legislación europea sobre emisiones.

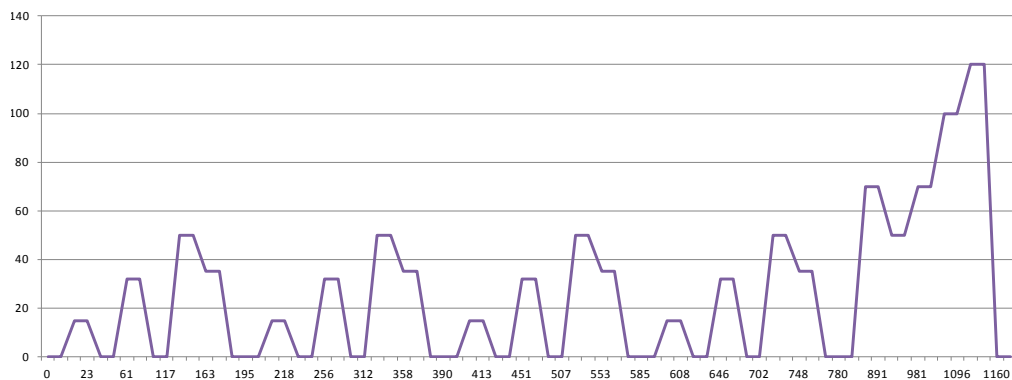


Figura 61. Representación velocidad (km/h) – tiempo (s) en ciclo NEDC.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

Sin embargo, en el ciclo que se va a introducir en el archivo DCD para la simulación se modificarán los tramos de velocidad 0 km/h por una velocidad mínima de 9 km/h. Este cambio se sustenta en dos razones: la primera es que el software no permite realizar simulaciones donde el vehículo alcance velocidad nula a lo largo de su trayecto debido a que esa circunstancia provoca un error en sus ecuaciones internas de cálculo de equilibrio de fuerzas, velocidades y aceleraciones. La segunda razón, por su parte, es que al tratarse de un vehículo eléctrico puro ya conocemos de antemano que la energía consumida por el motor cuando el vehículo se encuentre parado será nula. Es por ello que se decide sustituir esos tramos de velocidad cero por una velocidad baja (9 km/h) propia de un atasco en zonas urbanas lo cual nos proporcionará información sobre la energía consumida en situación de circulación a velocidad mínima.

Tras esta modificación, el ciclo que se va a utilizar en la simulación de vehículo es el que se muestra en la figura 62:

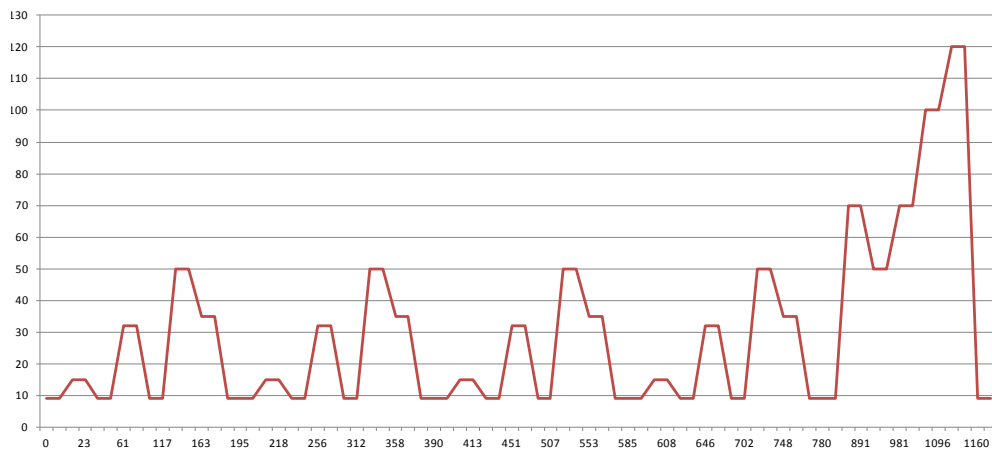
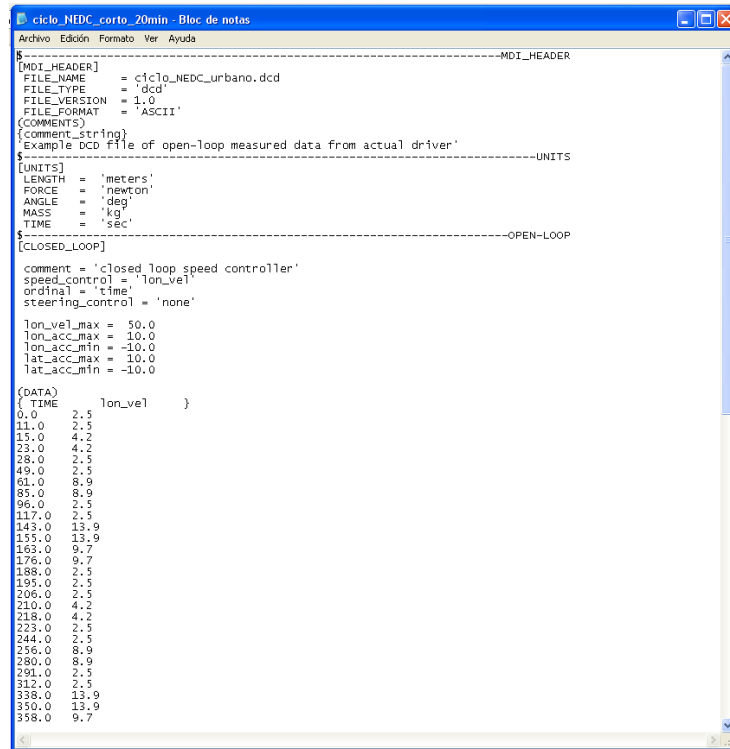


Figura 62. Representación velocidad (km/h) – tiempo (s) en del nuevo ciclo de simulación.

Una vez definido el ciclo de conducción, se debe introducir sus valores de velocidad respecto al tiempo en el archivo DCD mediante el editor de textos.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR



```
File Edit Format View Help
ciclo_NEDC_corto_20min - Bloc de notas

[MDI_HEADER]
FILE_NAME = ciclo_NEDC_urbano.dcd
FILE_TYPE = 'dcd'
FILE_VERSION = 1.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
(comment_string)
'Example DCD file of open-loop measured data from actual driver'
[UNITS]
LENGTH = 'meters'
FORCE = 'newton'
ANGLE = 'deg'
MASS = 'kg'
TIME = 'sec'
[OPEN-LOOP]
comment = 'closed loop speed controller'
speed_control = 'lon_vel'
ordinal = 'time'
steering_control = 'none'
lon_vel_max = 50.0
lon_acc_max = 10.0
lon_acc_min = -10.0
lat_acc_max = 10.0
lat_acc_min = -10.0
(DATA)
( TIME lon_vel )
0.0 2.5
11.0 2.5
11.0 4.2
23.0 4.2
28.0 2.5
49.0 2.5
61.0 8.9
85.0 8.9
96.0 2.5
117.0 2.5
143.0 13.9
155.0 13.9
163.0 9.7
176.0 9.7
188.0 2.5
195.0 2.5
206.0 2.5
210.0 4.2
218.0 4.2
223.0 2.5
244.0 2.5
256.0 8.9
280.0 8.9
291.0 2.5
312.0 2.5
338.0 13.9
350.0 13.9
358.0 9.7
```

Figura 63. Configuración del archivo DCD para la simulación.

El siguiente punto será determinar las características del trayecto a recorrer en la simulación.

❖ Configuración del trazado:

En el capítulo 4 se ha detallado los dos tipos de trazados que pueden crearse en Adams/Car: trazados abiertos o cerrados. En el caso de la presente simulación se optará por un trazado abierto que consistirá en una simple recta a recorrer de acuerdo al ciclo de conducción introducido. La razón de dicha decisión reside en que el principal objeto de estudio son las variables relacionadas con el consumo energético del vehículo así como las prestaciones del motor y no variables de estudio de tipo dinámico de subsistemas como las suspensiones, los neumáticos o la dirección en cuyo caso debería recorrerse un trazado con cambios de dirección y distinto tipo de curvas. Además, un trazado simple como el empleado minimizará el coste computacional de la simulación lo cual representa un factor a tener en cuenta.



Figura 64. Trazado en forma de recta empleado en la simulación.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

No obstante, este sencillo trazado permite estudiar la influencia de un factor fundamental en el consumo energético como es la pendiente del terreno. Por ello, habrá dos trazados sobre los que se lanzarán a simular las distintas configuraciones del vehículo establecidas en los epígrafes anteriores: un trazado sin pendiente y un trazado con cambios de pendiente a lo largo del recorrido.

El trazado sin pendiente se crea de manera muy sencilla en el editor “Road Builder” generando un tramo recto de una longitud de 13 km. La distancia es ligeramente superior a la correspondiente al ciclo definido por un razón de seguridad en la simulación evitando que el coche no se quede sin trazado que recorrer con el consiguiente error e interrupción de la simulación.

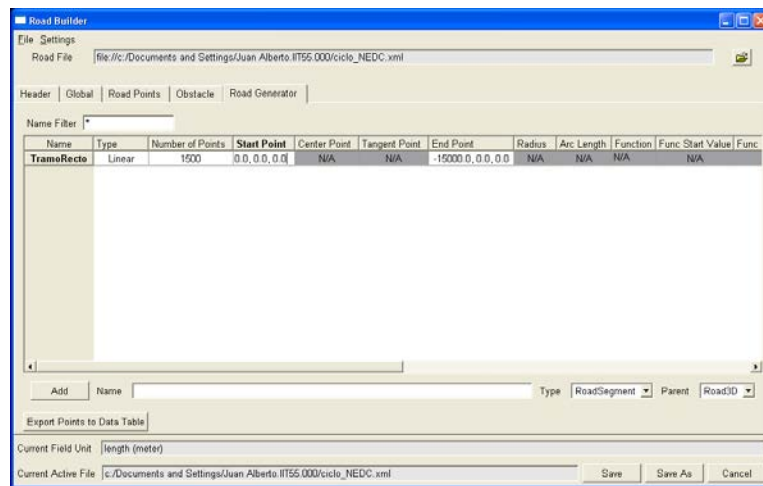


Figura 65. Modelización del trazado recto llano mediante “Road Builder”

En cuanto al trazado definido con pendiente a lo largo de su longitud se ha optado por el siguiente recorrido:

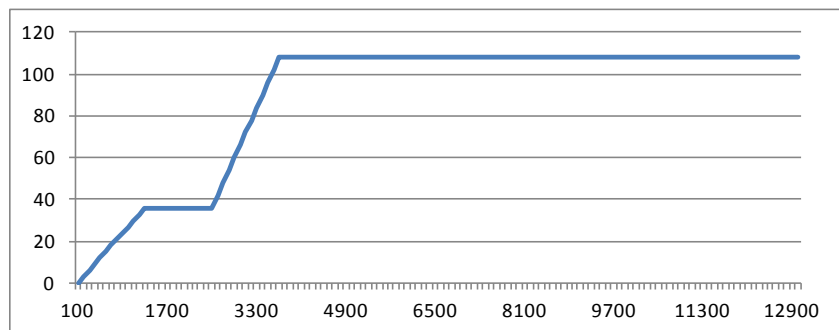


Figura 66. Altura recorrida (m) a lo largo del trazado.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

En la figura 66, se observa cómo se recorren pendientes de distinto nivel durante el recorrido combinado con tramos llanos. En concreto, el primer desnivel que presenta el trazado es una pendiente del 3% mientras el segundo desnivel consta de una pendiente del 6%. En total, los metros de desnivel recorridos son 110 m a lo largo del trazado. Para crear el recorrido virtual, habrá que introducir los puntos de inicio y final con las coordenadas X, Y, Z de cada tramo en las herramienta “Road Builder”.

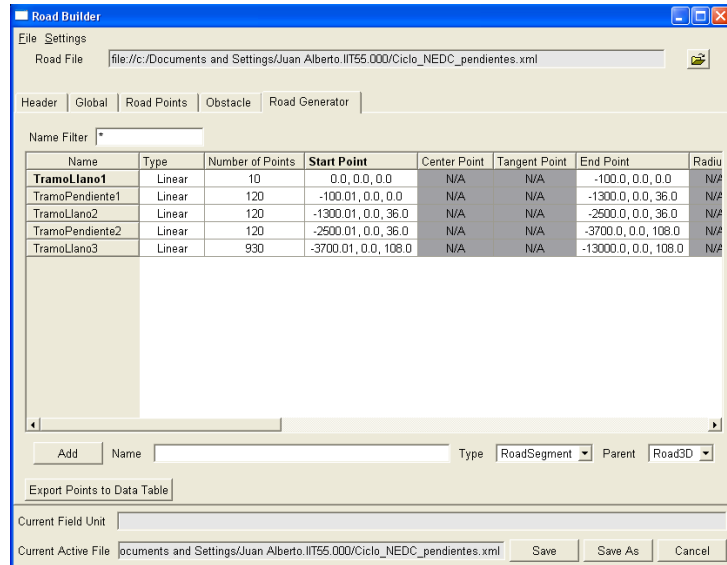


Figura 67. Modelización del trazado recto con pendiente mediante “Road Builder”

Una vez creado el trazado, se puede comprobar en la herramienta del programa que los datos introducidos son los correctos.

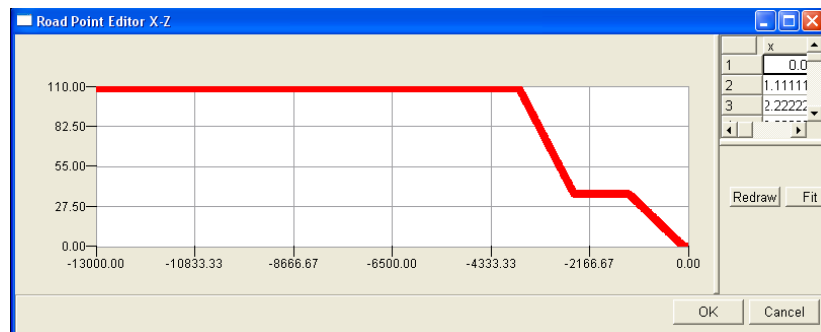


Figura 68. Verificación de la modelización del trazado con pendiente.

Con esta verificación finaliza la configuración de los trazados. El siguiente paso será definir las simulaciones a realizar.

5.3 Casos de simulación.

Una vez se ha definido las configuraciones del vehículo a simular, el ciclo de conducción y el trazado a recorrer, puede procederse a lanzar a calcular los casos de simulación.

En este apartado se va a resumir cuales han sido las simulaciones realizadas en función de la información que quiere obtenerse a partir de los resultados proporcionados por el software. La metodología para llevar a cabo las simulaciones mediante Adams/Car es sencilla, simplemente hay que seleccionar en el apartado “Simulate” la opción “3D Road” que permite lanzar casos tridimensionales en trazados definidos por el usuario. En la figura 69, se muestra los campos que deben rellenarse:

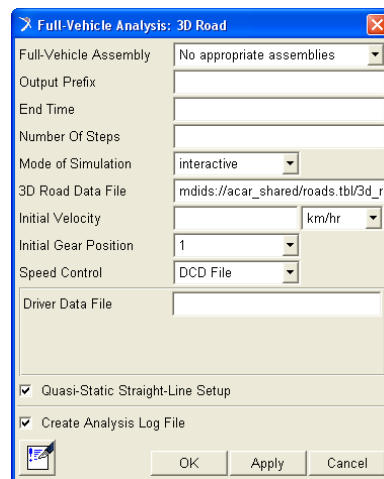


Figura 69. Configuración de la simulación en Adams/Car.

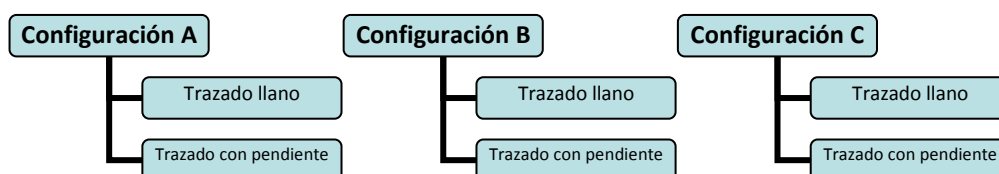
Para poner en marcha el análisis sólo es necesario introducir los siguientes datos:

- ✓ Ensamblaje de vehículo completo a analizar: Será una de las tres configuraciones descritas en los epígrafes anteriores.
- ✓ Nombre que se quiera dar al análisis: Este nombre lo recibirán los archivos que produce Adams/Car como salida en el directorio de trabajo.
- ✓ Tiempo de simulación: Segundos que se desea que dure la simulación del recorrido del vehículo por la carretera. En este caso será 1180 segundos, el tiempo de duración del ciclo de conducción.
- ✓ Número de pasos: En los que se desea dividir el tiempo de simulación. Es generado por el software a partir del tiempo de simulación. Se acepta el valor por defecto.

5. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO MEDIANTE ADAMS/CAR

- ✓ Modo de simulación: Para elegir entre crear únicamente los archivos de salida con los resultados, crear la salida como una animación o ambas cosas.
- ✓ Archivo de carretera 3D: debe indicarse el directorio en que se encuentra almacenado el archivo XML del modelo del trazado a recorrer
- ✓ Velocidad inicial: del vehículo en las unidades elegidas por el usuario. En este caso 2,5 m/s.
- ✓ Marcha inicial: en nuestro caso, tratándose de un vehículo eléctrico con una sola marcha, no se podrá elegir entre varias.
- ✓ Control de velocidad: donde es posible elegir entre un valor de aceleración longitudinal del vehículo para todo el recorrido o un archivo de formato DCD para controlar la velocidad del mismo. Se elige el archivo DCD
- ✓ Archivo DCD: debe indicarse el directorio donde se encuentra el archivo que controlará el vehículo en su recorrido por la carretera especificada. En él está definido el ciclo de conducción descrito en los capítulos anteriores. Esta opción sólo se activa en caso de haber seleccionado la opción de archivo y no de aceleración en el punto anterior.

El número total de casos que se van a simular será 6. En concreto, cada una de las tres configuraciones (A, B, C) se simulará con cada uno de los trazados (llano y con pendiente) respectivamente. A partir de los resultados se podrá conocer tanto la influencia de la configuración del vehículo para un mismo trazado como la influencia del trazado para una misma configuración. En el siguiente esquema se resumen los 6 casos existentes de simulación:



Una vez se llevan a cabo las 6 simulaciones con éxito, el siguiente paso es analizar los resultados obtenidos.

6. Análisis de los resultados de la simulación.

En este capítulo se va a llevar a cabo la presentación y análisis de los resultados de las simulaciones efectuadas con el software Adams / Car. Para ello y dado que el objetivo de dichas simulaciones es conocer el comportamiento energético del vehículo, las variables de estudio serán:

- *Velocidad de desplazamiento:* Proporciona información sobre si el vehículo es capaz de efectuar el ciclo de conducción de acuerdo a las condiciones establecidas.
- *Potencia suministrada por el motor:* Permite conocer y comparar la potencia que suministra el motor a lo largo del ciclo de conducción en un instante dado en las distintas simulaciones.
- *% de acelerador:* Es una variable que complementa la información de la anterior ya que permite entender cual es el nivel de potencia entregado por el motor en un tiempo dado del ciclo de conducción en comparación a la máxima potencia que podría suministrarse en dicho instante.
- *Energía consumida:* Informa al usuario de la cantidad de energía consumida por el vehículo a lo largo del ciclo de conducción.
- *Par-motor:* Proporciona el valor del par-motor suministrado por el motor eléctrico en un instante dado del ciclo de conducción.
- *Velocidad de giro del motor:* Informa del valor en un instante dado del ciclo de conducción de la velocidad de giro del motor eléctrico.

Antes de empezar con el análisis de resultados, es necesario hacer constar que algunas gráficas que se muestran a continuación, en concreto aquellas en las que se muestra el ciclo completo, poseen una mala calidad de resolución debido a una deficiencia del propio software. Es por ello, que asimismo se incluyen los resultados de la zona urbana por una parte y los de la zona extra-urbana por otra, así como cualquier detalle de la gráfica que sea de interés en la comprensión del resultado de la simulación.

6.1 Influencia de la configuración peso-motor para un mismo trazado.

En primer lugar, se va analizar la influencia de la configuración peso-motor para un mismo trazado, es decir, se compara los resultados obtenidos por cada una de las tres configuraciones (A, B, C) en el trazado llano por un lado y en el trazado con pendiente por otro.

❖ Trazado llano:

Estos son los resultados de las tres configuraciones para el trazado llano:

➤ Velocidad de desplazamiento:

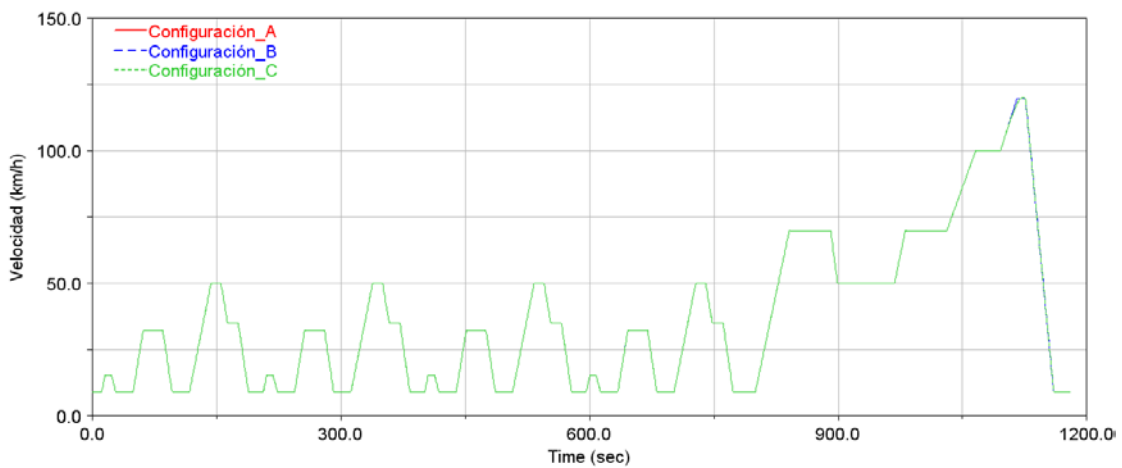


Figura 70. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano.

Se puede observar como en la parte urbana del ciclo se cumplen las condiciones establecidas de velocidad respecto al tiempo por lo que las líneas que representan cada configuración aparecen superpuestas.

Sin embargo, en la zona extra-urbana parece apreciarse en el momento de mayor velocidad (120km/h) una pequeña divergencia.

Veámoslo con más detalles en las figuras 71, 72 y 73:

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

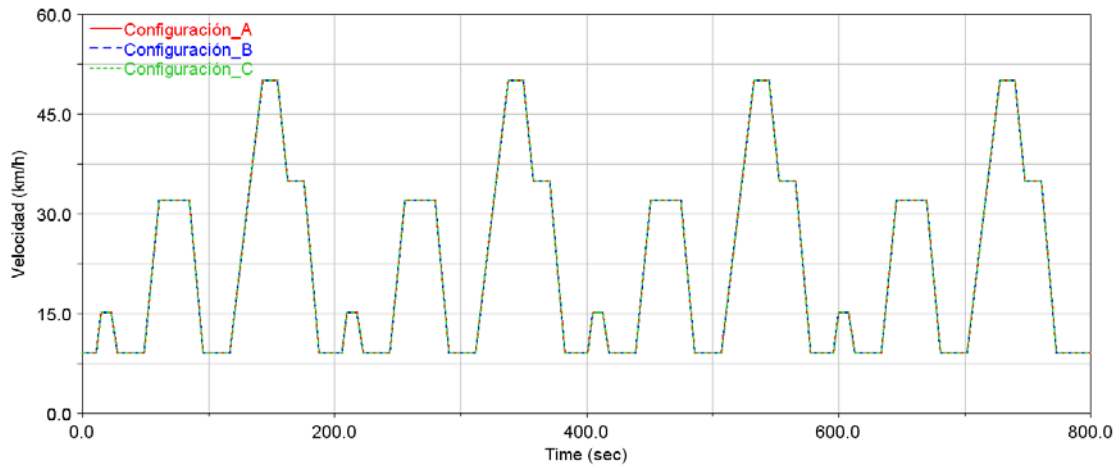


Figura 71. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.

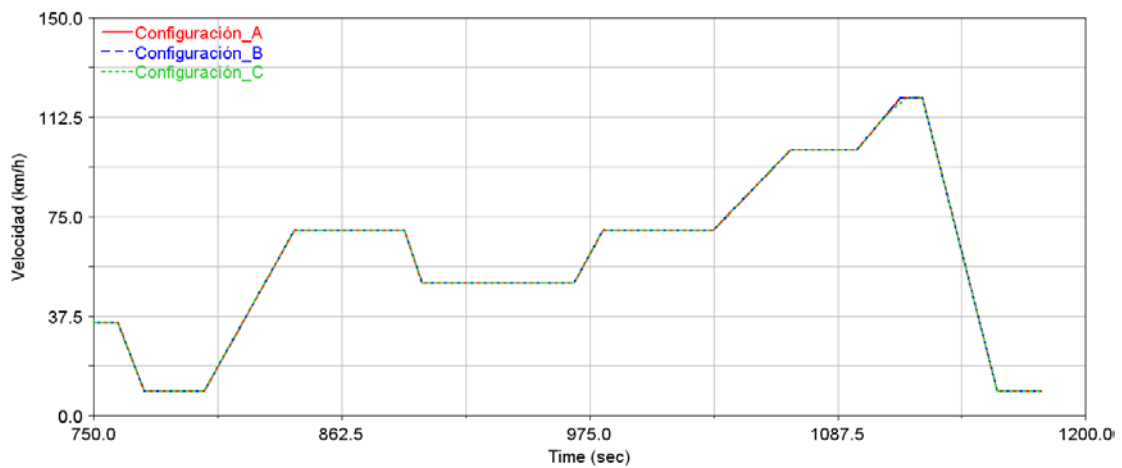


Figura 72. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

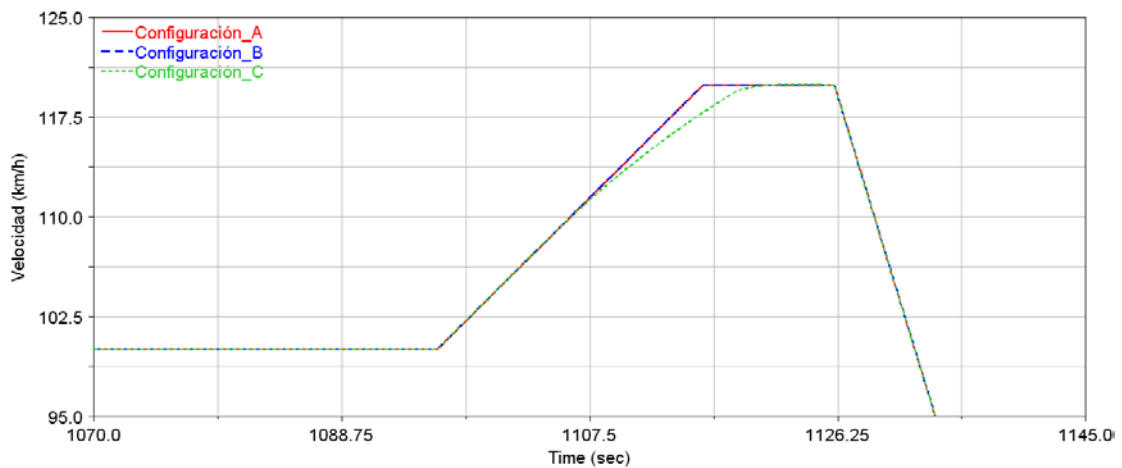


Figura 73. Detalle de la zona de máxima velocidad

Efectivamente en el caso de la configuración C, aquella que combina toda la masa de baterías cargadas en el vehículo pero solo están conectadas aquellas que garantizan el funcionamiento del motor en tensión mínima de 250V, no es capaz de alcanzar la

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

máxima velocidad del ciclo (120 km/h) en el instante de tiempo establecido. Es decir, la potencia máxima que suministra el motor en el caso de la configuración C no es capaz de proporcionar la aceleración necesaria al vehículo para alcanzar dicha velocidad en el momento fijado.

➤ Potencia suministrada por el motor:

Véase a continuación las gráficas de potencia suministrada por el motor eléctrico para conocer su evolución a lo largo del ciclo de conducción:

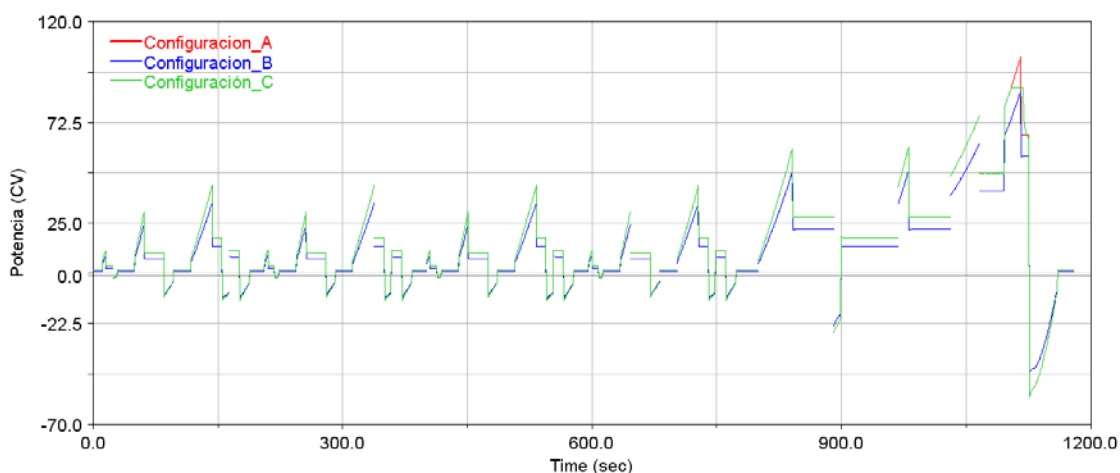


Figura 74. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano.

Para una mayor claridad se muestran las gráficas diferenciando parte urbana y parte extra-urbana:

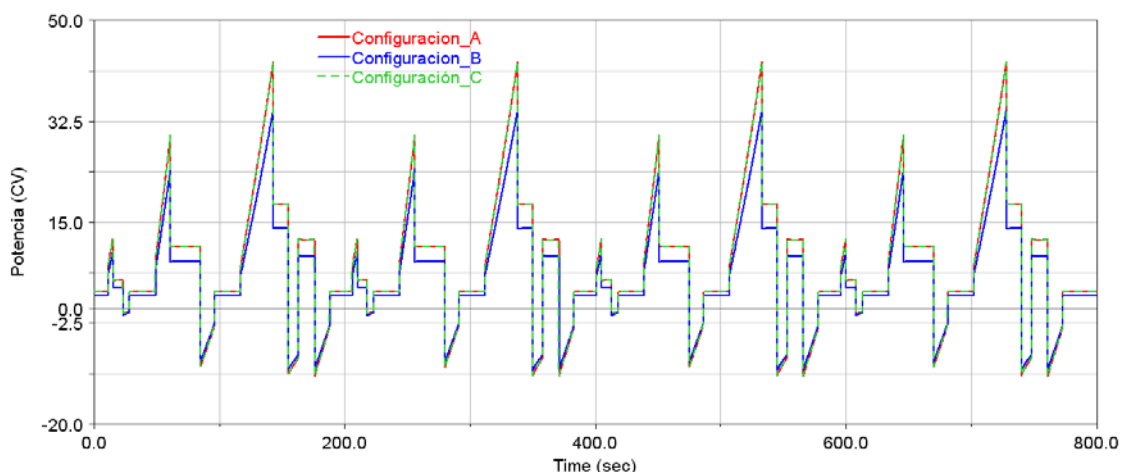


Figura 75. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

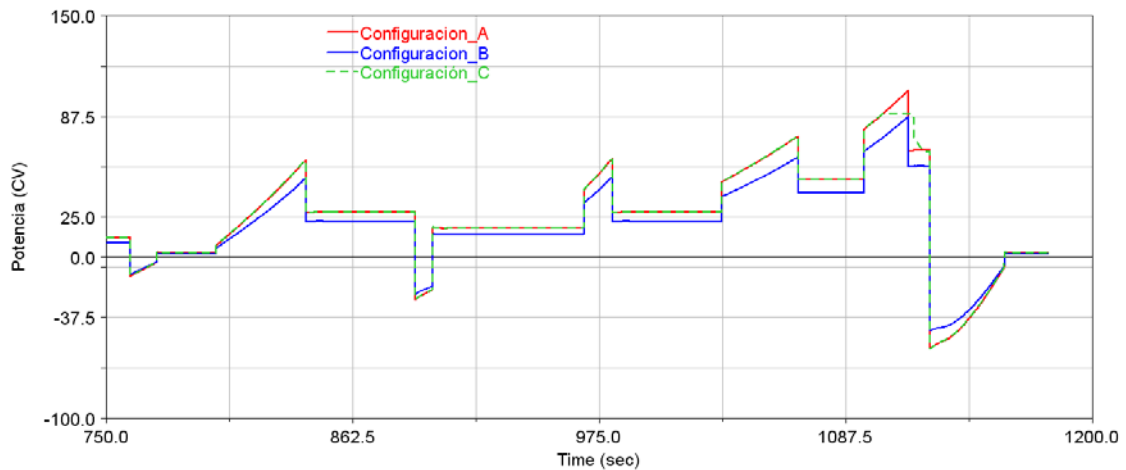


Figura 76. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

La información que nos proporcionan los resultados que se muestran en las figuras 74, 75 y 76 permite ver como en la zona urbana del ciclo la potencia suministrada por el motor para las configuraciones A y C es la misma mientras que la potencia suministrada para la configuración B es menor. Un resultado lógico teniendo en cuenta que la resistencia al avance que deben vencer las configuraciones A y C es la misma ya que en ambos vehículos el valor de la masa total es idéntico. Mientras, la configuración B requiere de una menor potencia suministrada dado el menor peso del vehículo.

Por otro lado, en la zona extra-urbana puede observarse como la configuración B sigue requiriendo de una menor potencia frente a las otras dos configuraciones. Estas, por su parte, siguen manteniendo su convergencia hasta alcanzar la zona de máxima velocidad del ciclo de conducción. Es ahí donde se explica porque la configuración C no es capaz de cumplir con la exigencia, de velocidad en un instante dado, establecida en el ciclo y es que la potencia necesaria para ello es superior a la máxima que es capaz de suministrar el motor eléctrico en las condiciones de funcionamiento de la configuración C.

En el siguiente apartado, se analiza cual es el tanto por ciento de acelerador que hay que pisar en cada instante del ciclo de conducción para recorrerlo de acuerdo a las condiciones establecidas. Esta información nos permite saber de manera cualitativa cuál es el nivel de potencia que está entregando el motor respecto al máximo que podría entregar en ese mismo momento. Del resultado visto en las figuras anteriores puede deducirse que en la configuración C al recorrer la zona de máxima velocidad del ciclo necesitará el 100% de acelerador.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ % de acelerador:

En las siguientes figuras 77, 78 y 79, se presentan las gráficas referentes al % de acelerador pisado. El resultado en eje de ordenadas se presenta en tanto por uno siendo el valor 0 el acelerador sin pisar y el valor 1 el acelerador pisado a fondo. En el comentario de las gráficas se referirá a dicho valor como % para una mayor claridad en la interpretación de los resultados de simulación.

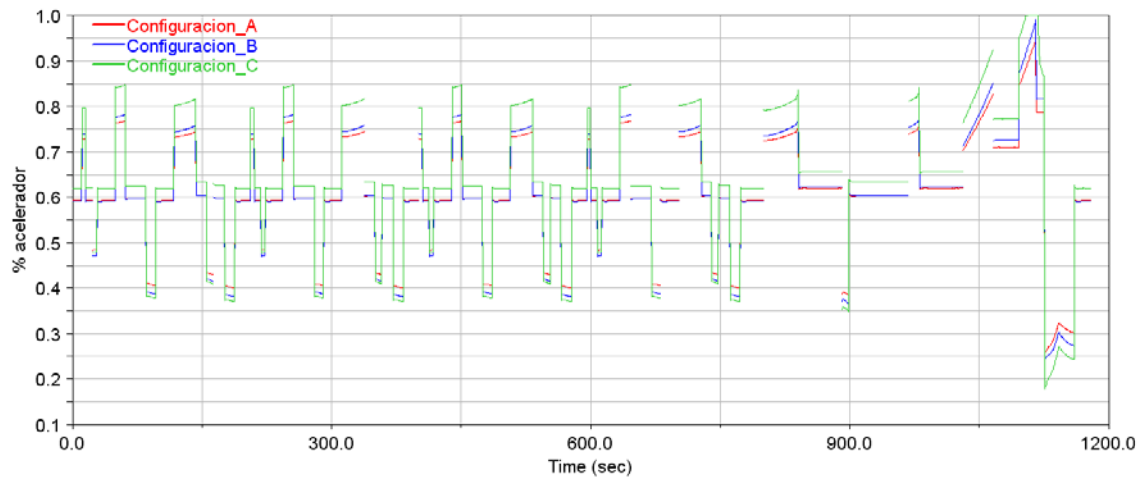


Figura 77. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano.

Como en los epígrafes anteriores, se muestran los resultados en zona urbana y extra-urbana por separado para una mayor calidad de imagen.

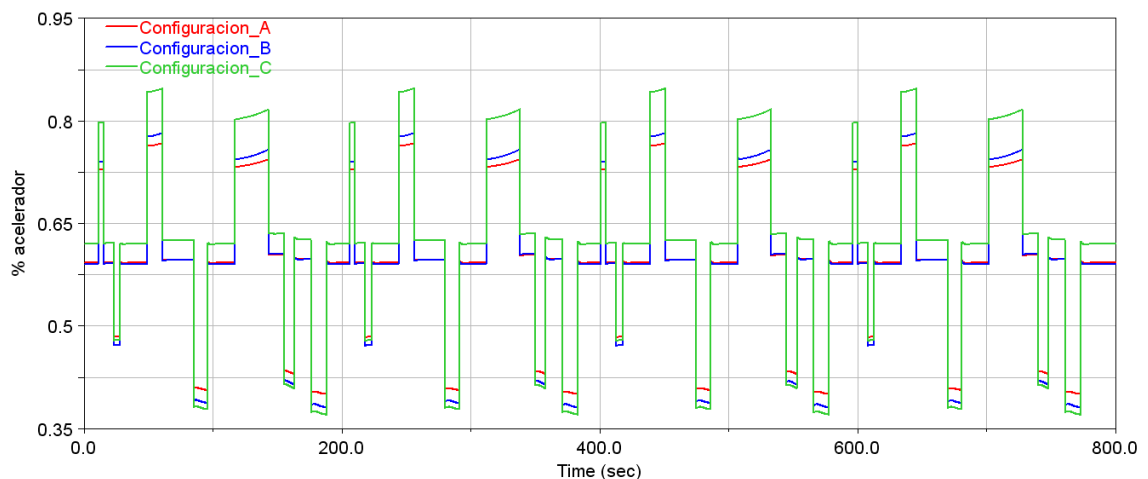


Figura 78. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

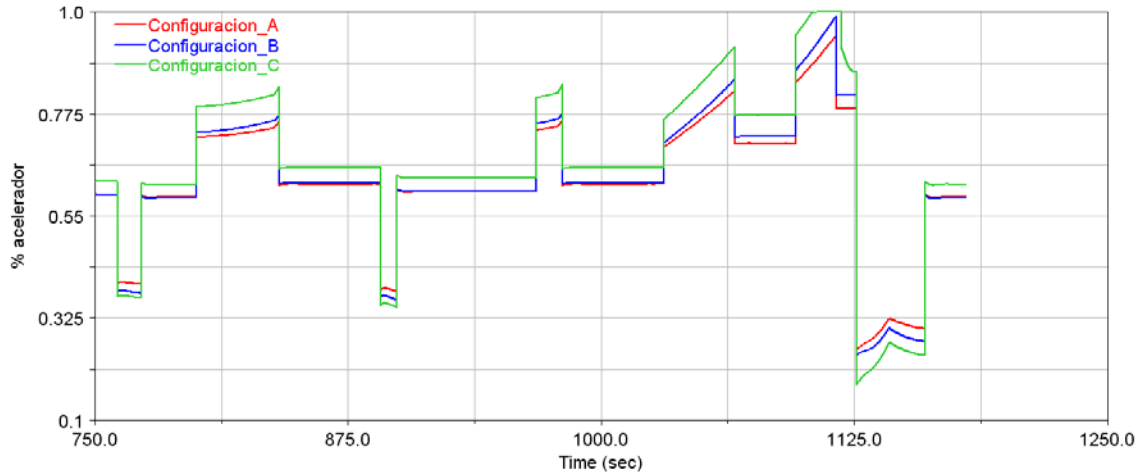


Figura 79. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

Los resultados de las figuras 77, 78 y 79 muestran que la configuración C es la que requiere de un mayor % de acelerador durante todo el ciclo, algo completamente lógico dado su configuración de máxima carga de masa de batería y conexión de módulos para mínima tensión eléctrica de funcionamiento del motor eléctrico. Además en el punto de máxima velocidad del ciclo alcanza el 100%, un hecho que como se ha podido ver en los resultados anteriores no consigue que el vehículo cumpla las condiciones del ciclo por falta de potencia en el motor.

En cuanto a las configuraciones A y B, ambas siguen una lógica en cuanto a su valor a lo largo del ciclo de acuerdo a las exigencias de velocidad en cada instante. Además, en ningún caso se alcanza el 100% lo que indica que el vehículo aun tendría capacidad en un instante dado, en ambas configuraciones, para acelerar o para subir una pendiente sin perder velocidad. Si se realiza un análisis comparativo en ellas, se observa una mayor necesidad de acelerador para la configuración B que para la A, este resultado nos informa de que en la configuración B la reducción de potencia que sufre el motor eléctrico en sus prestaciones tiene ligeramente una mayor influencia que la reducción de peso que conlleva la extracción de baterías no conectadas en comparación con la configuración de peso-motor A. Es decir, aunque la potencia necesaria para recorrer el ciclo en las condiciones establecidas con el vehículo en configuración B sea menor que en configuración A debido a la menor masa del vehículo, el descenso de prestaciones que sufre el motor eléctrico en la configuración B supone un mayor valor de acelerador pisado respecto al necesario en la configuración A donde el motor dispone de la capacidad para suministrar sus máximas prestaciones.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Energía consumida:

En este apartado, se presentan los resultados de la energía consumida por el vehículo en cada configuración peso-motor a lo largo del ciclo de conducción.

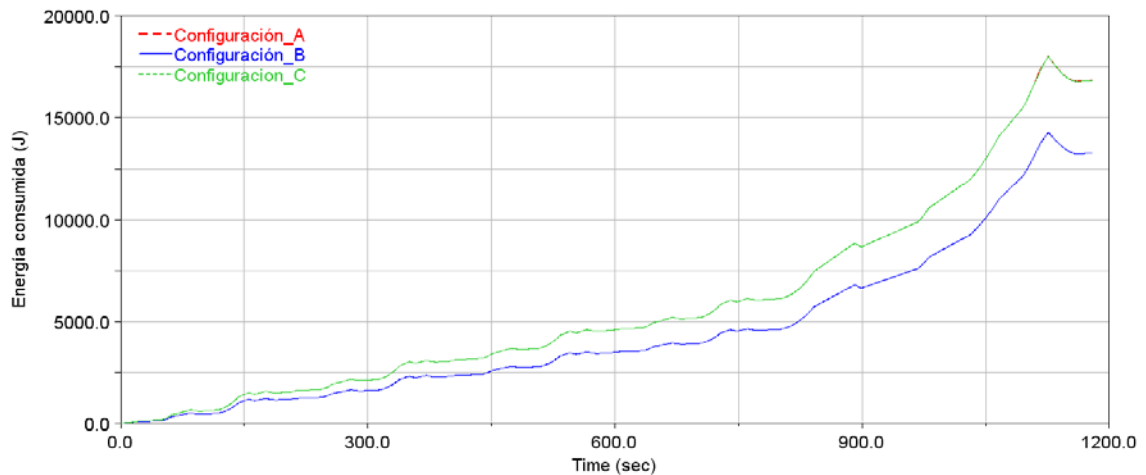


Figura 80. Energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado llano.

El resultado que muestra la figura 80, permite ver como la masa total del vehículo tiene una influencia determinante en el consumo energético. El vehículo en configuración B consume menos que en configuración A y en configuración C. El ahorro energético de dicha configuración es mayor cuanto más alta es la velocidad de desplazamiento como puede verse en la zona extra-urbana.

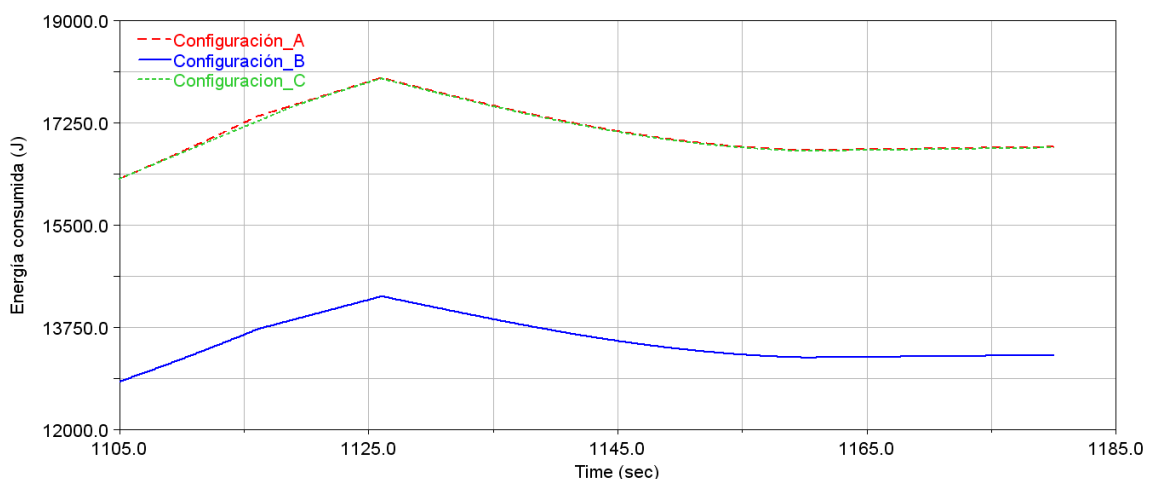


Figura 81. Detalle de la energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

En el caso de las configuraciones A y C, la energía consumida es la misma debido a la igualdad de masas de los vehículos. Únicamente existe una pequeña divergencia en la zona de máxima velocidad del ciclo por la falta de potencia de la configuración C.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Par-motor:

Una vez visto el resultado de la potencia suministrada por el motor, se procede a analizar los resultados del par-motor a lo largo de ciclo de conducción para alcanzar un mayor grado de entendimiento global del comportamiento del motor eléctrico.

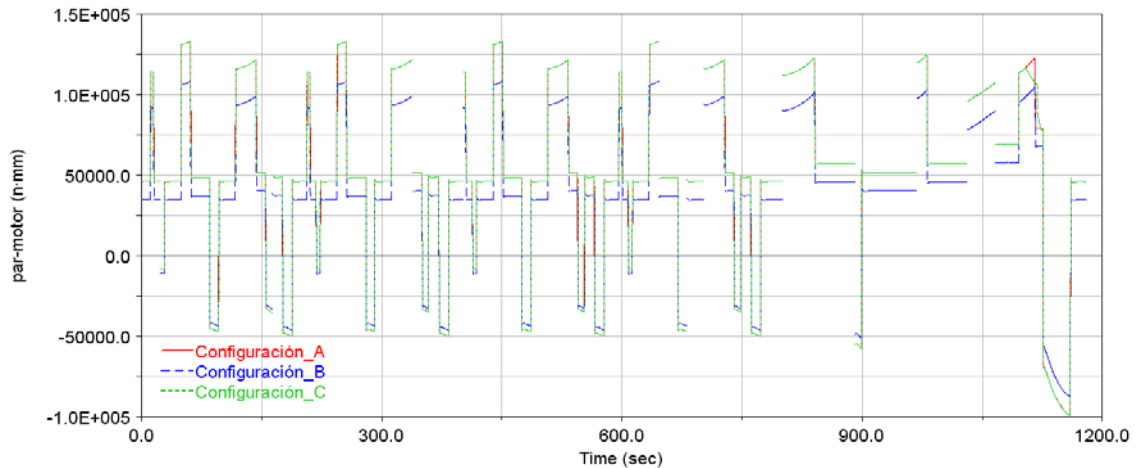


Figura 82. Par motor (N-mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano.

Se sigue con la metodología de mostrar la zona urbana y extra-urbana de manera independiente:

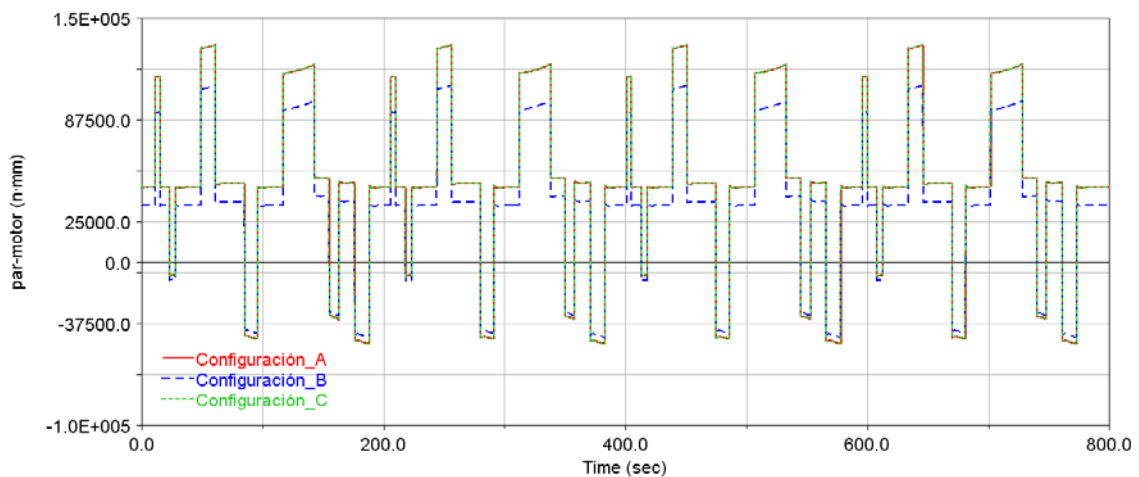


Figura 83. Par motor (N-mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.

En coherencia con los resultados obtenidos en anteriores apartados, se muestra, como en zona urbana, el motor debe suministrar un mayor par en las configuraciones A y C como consecuencia de la mayor potencia requerida debido a la mayor masa total del vehículo frente a la configuración B.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

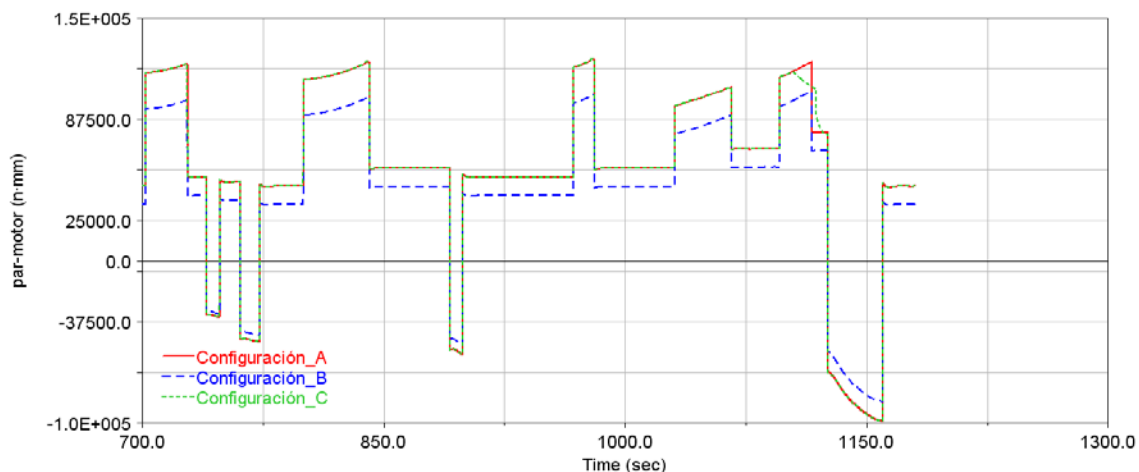


Figura 84. Par motor (N·mm) suministrado para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

En la zona extra-urbana se mantiene la misma tendencia de resultados para el par motor suministrado que en la zona urbana. El hecho más destacable reside en la zona de máxima velocidad del ciclo de conducción donde se puede observar como, en la configuración C, el motor eléctrico no es capaz de proporcionar el par necesario para alcanzar la velocidad establecida (120 km/h) en el instante de tiempo fijado mientras la configuración A si lo consigue gracias al uso de su motor que trabaja en el rango de máxima tensión eléctrica (400V) con la consecuente capacidad de proporcionar sus máximas prestaciones.

➤ Velocidad de giro del motor eléctrico:

La última variable que se va a analizar es la velocidad de giro del motor eléctrico.

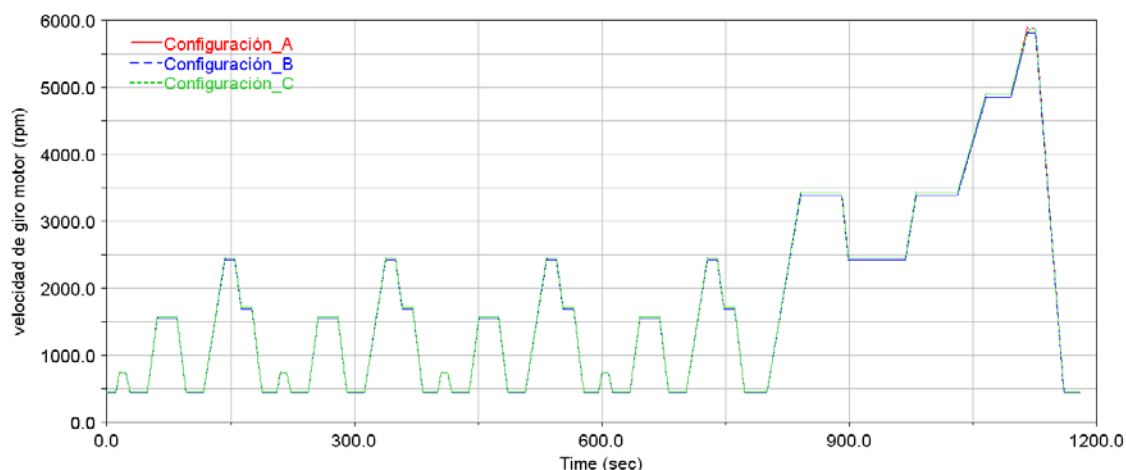


Figura 85. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La figura 85 muestra como la velocidad de giro del motor en las tres configuraciones se encuentra en un rango de valor prácticamente igual a lo largo del ciclo de conducción y como dicho valor aumenta conforme lo estipulan las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo.

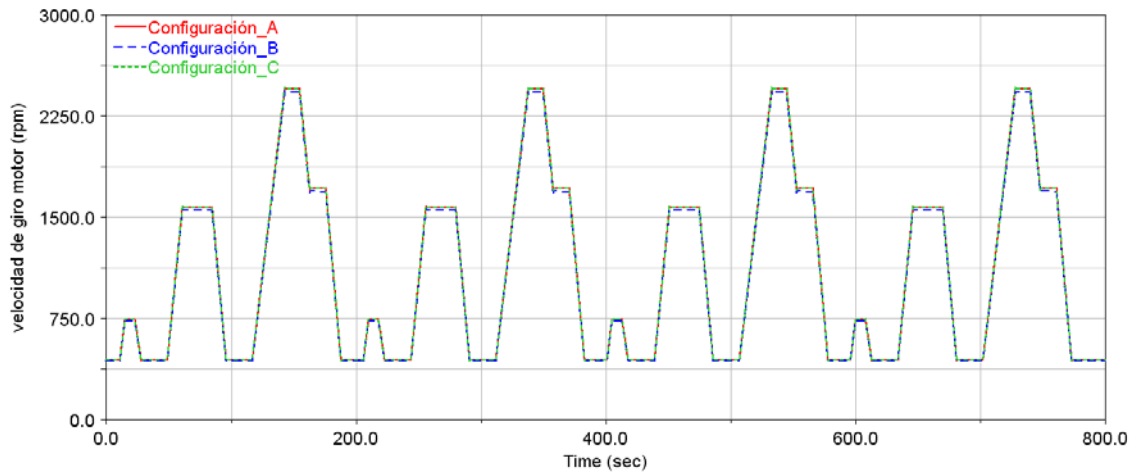


Figura 86. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano en zona urbana.

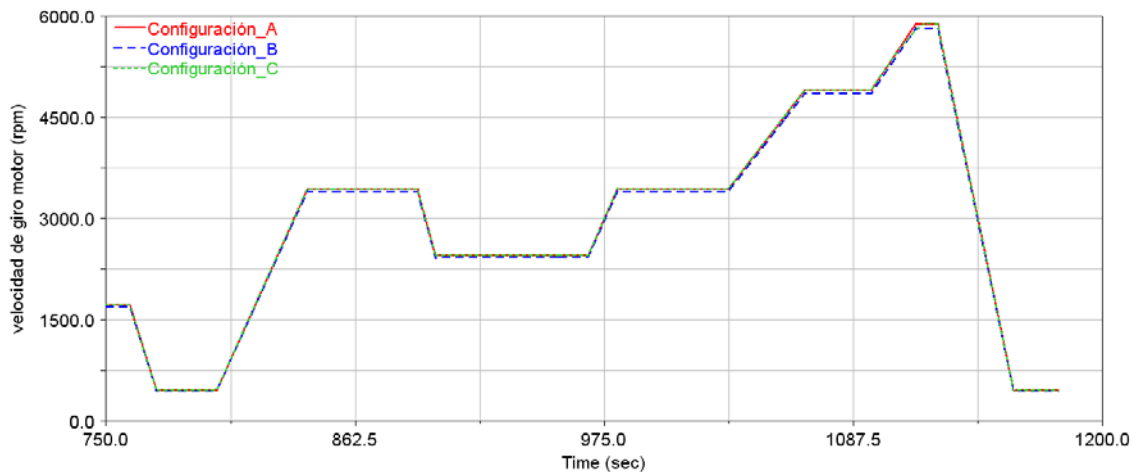


Figura 87. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado llano en zona extra-urbana.

En las figuras 86 y 87, puede observarse con mayor detalle la evolución de la velocidad de giro del motor en la zona urbana y en la zona extra-urbana respectivamente. En ninguna de las tres configuraciones se superan las 6000 rpm a lo largo del recorrido.

A continuación, se va a analizar comparativamente el comportamiento de las tres configuraciones (A, B, C) en un trazado con pendientes a lo largo del recorrido.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Cuantificación de la influencia de las variables en la potencia suministrada:

Para concluir este apartado, en las tablas 22 y 23 se muestra cuantitativamente la influencia de la masa del vehículo en la potencia suministrada por el motor en aquellas zonas de máximo valor de la misma, las cuales se marcan en la siguiente figura 88:

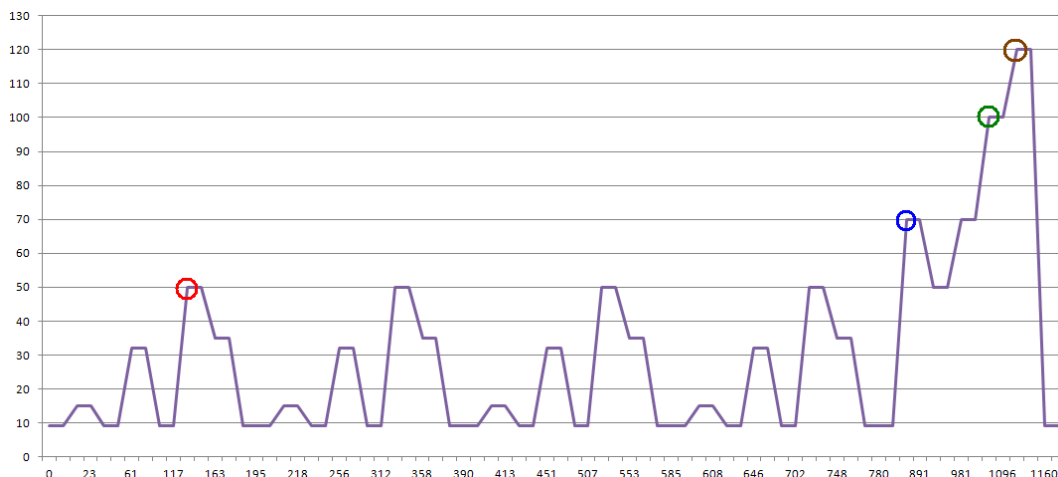


Figura 88. Zonas de estudio de máxima potencia en el ciclo de conducción para el trazado llano.

Trazado llano	Potencia (CV)	% incremento	Potencia (CV)	% incremento
Configuración A/C (+14% masa)	43.00	26.47	61.00	22.00
Configuración B	34.00	0.00	50.00	0.00
Velocidad (km/h)	50.00		70.00	

Tabla 22. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado llano 1/2.

Trazado llano	Potencia (CV)	% incremento	Potencia (CV)	% incremento
Configuración A/C (+14% masa)	75.00	20.97	103.00	18.39
Configuración B	62.00	0.00	87.00	0.00
Velocidad (km/h)	100.00		120.00	

Tabla 23. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado llano 2/2.

Puede observarse en las tablas 22 y 23 como influye la mayor masa de baterías cargadas (incremento del 14% de masa total del vehículo) en las configuraciones A y C frente a la configuración B generando un aumento de la potencia suministrada por el motor. El descenso del % de incremento a medida que avanza el crecimiento de la velocidad de desplazamiento en el punto analizado se debe a un descenso en el valor de la aceleración de cada tramo previo respectivo que atenúa el impacto de la masa en el valor de potencia suministrada. En el caso del instante de tiempo en el que se alcanzan los 120 km/h dado que la configuración C no es capaz de conseguirlo por déficit de potencia, el valor corresponde únicamente a la configuración A.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

❖ Trazado con pendientes:

En la figura 89 se presenta el perfil de alturas del trazado con pendiente definido en el apartado 5.2.

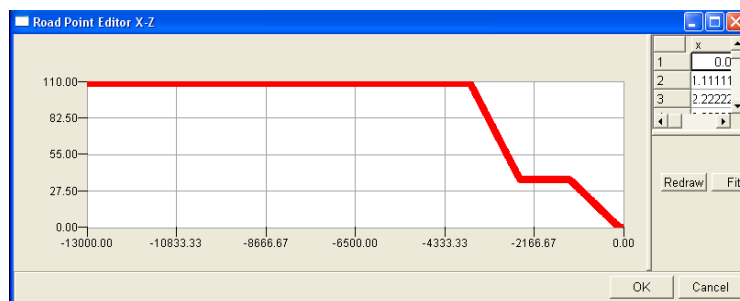


Figura 89. Perfil de alturas correspondiente al trazado con desnivel.

Como puede observarse en la imagen, las zonas con pendiente se encuentran en la zona urbana del ciclo, concretamente el desnivel del 3% coincide con el primer mini-ciclo de los cuatro de la zona urbana y el desnivel correspondiente al 6% coincide con el tercer mini-ciclo de los cuatro existentes. La zona extra-urbana se recorre por un trazado llano, es por ello que en este apartado solo van a mostrarse los resultados de la parte urbana ya que los resultados correspondientes a la zona extra-urbana son exactamente iguales que en el epígrafe anterior. Con esta decisión se busca no sobrecargar el capítulo con imágenes de resultados que ya no aportan información nueva.

Estos son los resultados de simulación obtenidos de las tres configuraciones (A, B, C) en el trazado con pendientes:

➤ Velocidad de desplazamiento:

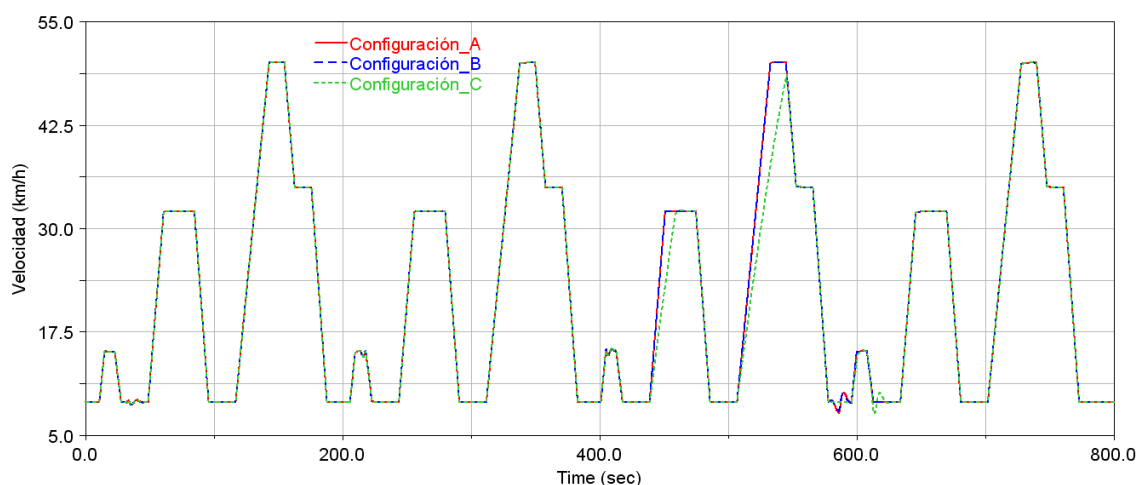


Figura 90. Velocidad de desplazamiento (km/h) para cada configuración en el trazado con pendiente en zona urbana.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La información que proporciona la figura 90 permite comprender que las configuraciones A y B cumplen con las condiciones de velocidad-tiempo establecidas por el ciclo de conducción mientras la configuración C no es capaz de hacerlo en la zona de pendiente del 6% (400s-600s). En cambio, si lo logra en la zona de pendiente del 3%.

➤ Potencia suministrada por el motor:

Véase el resultado de simulación obtenido para la variable de potencia suministrada por el motor para comprender con mayor claridad la situación:

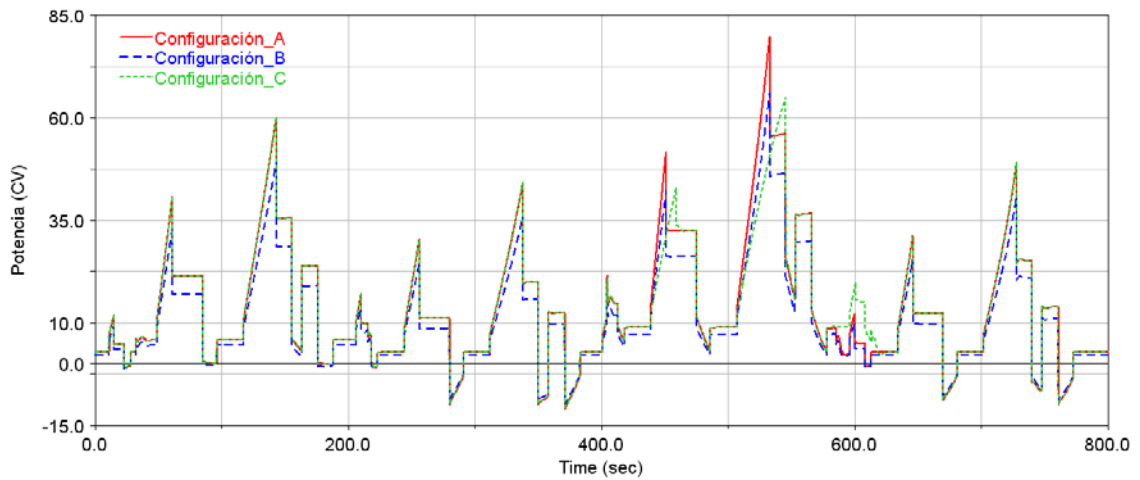


Figura 91. Potencia suministrada por el motor (CV) para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.

La gráfica que presenta la figura 91 muestra como en las zonas sin pendiente (200s-400s y 600s-800s) los valores de potencia suministrada por el motor son idénticos a los vistos en el resultado de potencia del apartado anterior correspondiente al trazado llano. Puede observarse como la configuración A y C requieren de la misma potencia dada su igualdad de masa total en el vehículo mientras la configuración B requiere de una potencia menor como consecuencia de su menor masa de baterías montadas en el coche.

En cuanto a los tramos de pendiente, la zona de desnivel del 3% (0s-200s) muestra como es necesaria una mayor potencia entregada por el motor para recorrer el trazado de acuerdo a las condiciones establecidas por el ciclo de conducción. Además, se mantiene la igualdad de valores para la configuración A y C y el valor inferior de la configuración B como consecuencia de las masas totales de cada vehículo.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Por su parte, en el tramo correspondiente al desnivel del 6% (400s-600s) se observa el aumento de potencia requerida para cada configuración frente a las situaciones de llano y desnivel del 3% así como la incapacidad de la configuración C para alcanzar la potencia necesaria en las condiciones de marcha de dicho instante que desemboca en el incumplimiento de las exigencias velocidad tiempo del ciclo de conducción.

➤ % acelerador:

Esta es la gráfica obtenida para la variable de % de acelerador pisado a lo largo del ciclo de conducción:

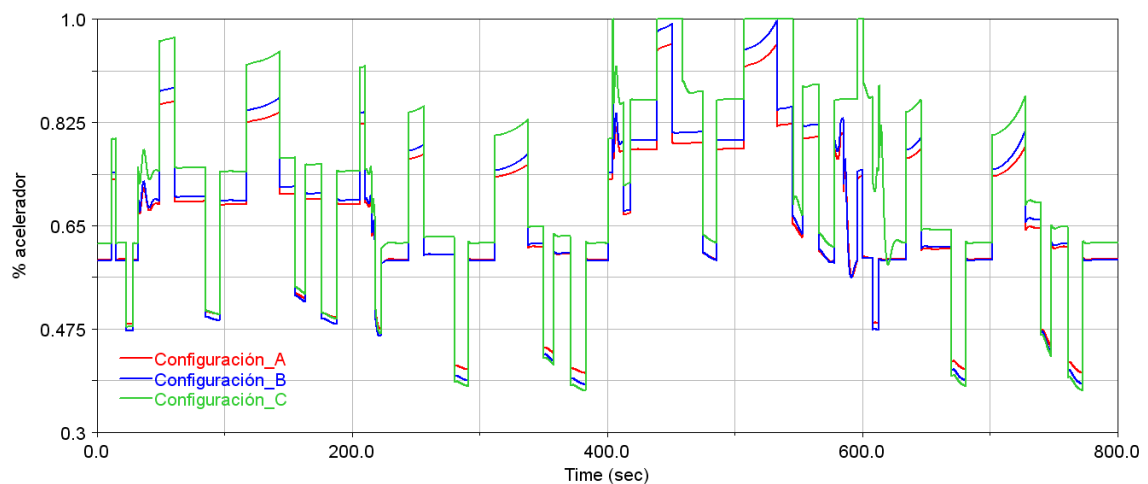


Figura 92. % de acelerador pisado para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.

En primer lugar, si se analiza los tramos llanos (200s-400s y 600s-800s) se observa como siguen lógicamente el resultado del apartado anterior correspondiente al análisis en el trazado completamente llano. La configuración C es la que necesita de un mayor % de acelerador pisado como consecuencia de su configuración peso vehículo-mapa motor, mientras la configuración A es la que presenta un % de acelerador más bajo. Esta circunstancia, ya comentada en el caso de la simulación en el trazado llano, permite entender que el descenso de masa del vehículo tiene una influencia ligeramente menor frente al descenso de prestaciones que sufre el motor.

Como se vio en el análisis del % de acelerador para el trazado totalmente llano, no se alcanzaba en ningún instante el 100% lo que indicaba de manera cualitativa que el vehículo tenía capacidad para cumplir las condiciones del ciclo de conducción en caso de recorrer una zona de pendiente. El resultado que presenta la figura 92 permite corroborar dicha conclusión al mostrar como en la zona de desnivel del 3% (0s-200s), el

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

vehículo en sus tres configuraciones (A, B, C) es capaz de cumplir con las exigencias de velocidad-tiempo del ciclo a base de aumentar el % de acelerador pisado. Por su parte, la zona de pendiente del 6% (400s-600s) proporciona un valor indicativo de donde se sitúa el límite de desnivel que puede superarse de acuerdo a las condiciones del ciclo. Como se muestra en la gráfica, la configuración C pese a alcanzar el 100% de acelerador no consigue alcanzar los valores establecidos de velocidad-tiempo por falta de potencia suministrada por el motor mientras las configuraciones A y B si lo consiguen pero sitúan el % de acelerador muy cerca del 100 (alrededor de 90%). Esta circunstancia indica que el límite de desnivel para esas condiciones que impone el ciclo de conducción en la zona urbana está cerca del 6%.

➤ Energía consumida:

En este apartado, se presentan los resultados de la energía consumida por el vehículo en cada configuración peso-motor a lo largo del ciclo de conducción para el trazado con desnivel.

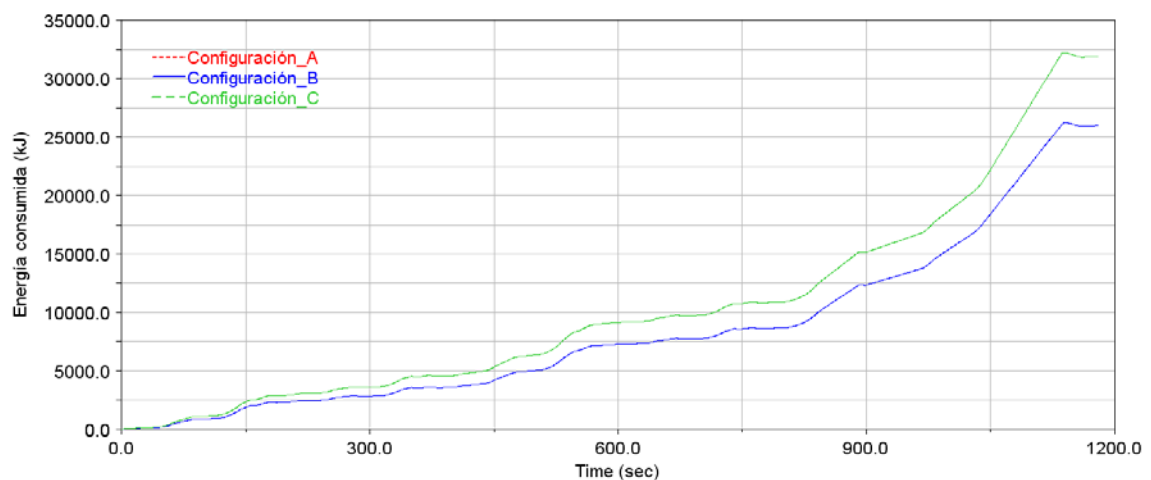


Figura 93. Energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado con pendiente.

El desnivel en un recorrido es una variable de gran importancia al influir de manera decisiva en el incremento del consumo energético, este hecho se estudiará con más detalle en el siguiente apartado de análisis de la influencia del trazado para una misma configuración de peso-motor.

En la figura 93, se muestra como las configuraciones A y C poseen un mayor consumo como consecuencia de su mayor masa total de baterías frente a la configuración B. De

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

manera global, se observa como el consumo en la zona extra-urbana es mayor a consecuencia de las mayores velocidades de desplazamiento que alcanza el vehículo.

La gráfica correspondiente a la figura 94 presenta en detalle el consumo de las tres configuraciones (A, B, C) en zona urbana:

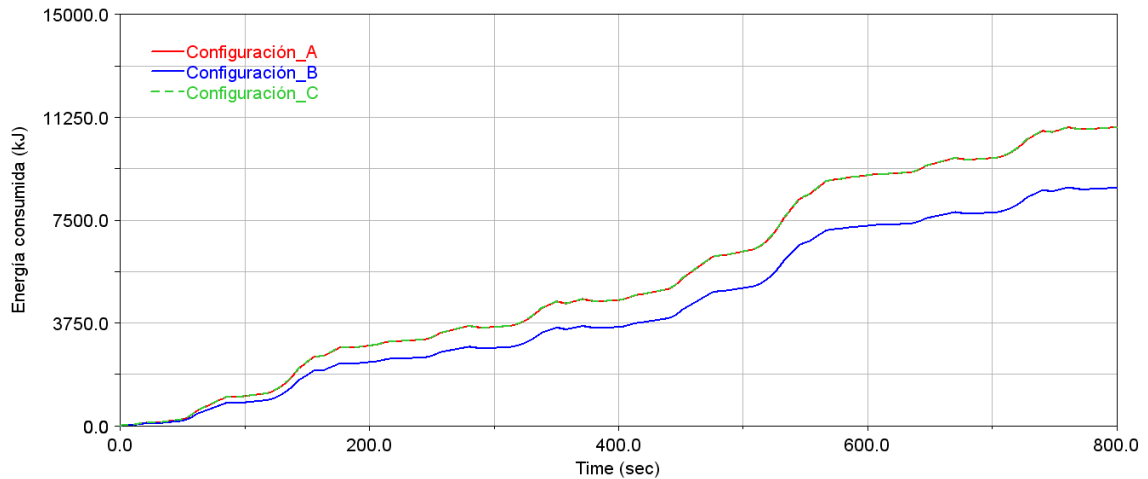


Figura 94. Detalle de la energía consumida (kJ) para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.

➤ Par motor:

Para comprender con mayor claridad el funcionamiento del motor eléctrico, se procede a analizar la evolución de los valores de par-motor suministrado a lo largo del ciclo de conducción:

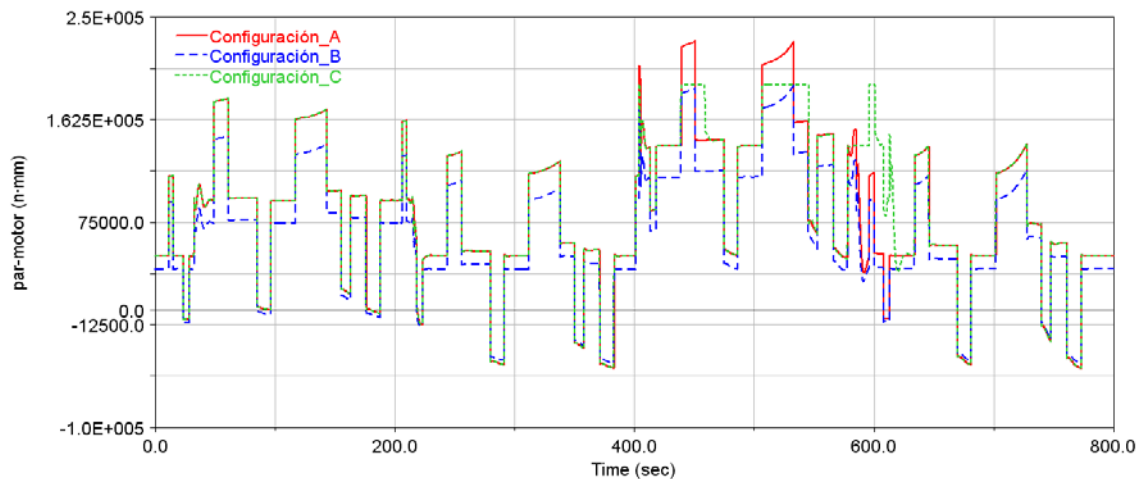


Figura 95. Par motor (N-mm) suministrado para cada configuración en el trazado en pendiente en zona urbana.

En las zonas de trazado llano (200s-400s y 600s-800s), se observa como el valor de par-motor de las configuraciones A y C es el mismo y superior al valor de la configuración B.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una situación lógica dadas las potencias que son requeridas en cada caso y que dependen como se ha visto de la masa total del vehículo.

La tendencia, explicada en el párrafo anterior, se mantiene para la zona de desnivel del 3% (0s-200s) con el consiguiente aumento del valor de par-motor entregado por el motor en cada configuración a consecuencia de la influencia de la pendiente frente a la situaciones de la zona completamente llana. Mientras, en la zona de desnivel del 6% se puede observar una nueva explicación al hecho de que la configuración C no consiga cumplir en esa zona con las condiciones establecidas por el ciclo de conducción al no ser capaz el motor eléctrico de suministrar el valor de par-motor necesario que marca la configuración A.

➤ Velocidad de giro del motor eléctrico:

Por último, se estudiará el comportamiento de la velocidad de giro de motor eléctrico a lo largo del ciclo para el trazado con desnivel.

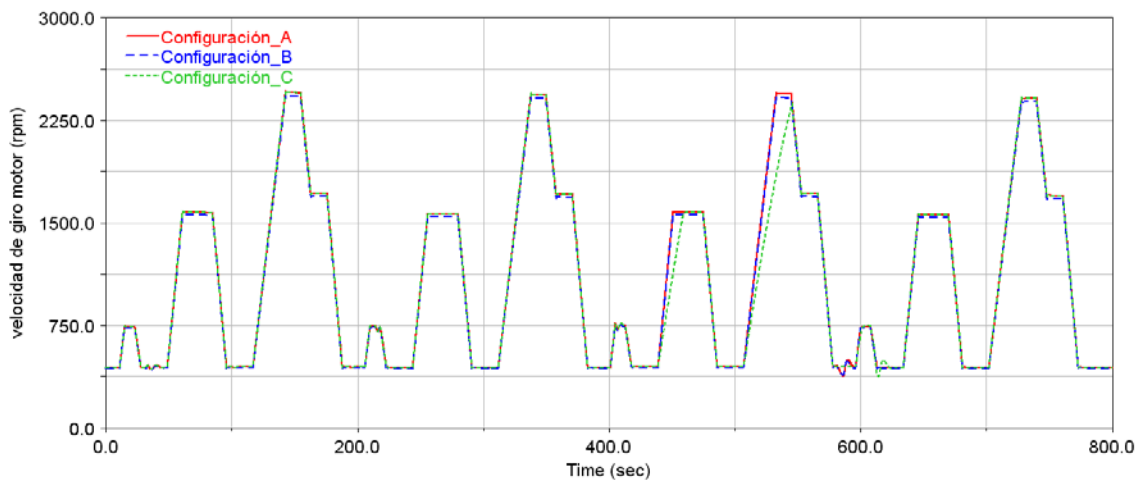


Figura 96. Velocidad de giro del motor (rpm) para cada configuración en el trazado con pendiente en zona urbana.

En la figura 96, se muestra como la velocidad de giro del motor en las tres configuraciones se encuentra en un rango de valor prácticamente igual a lo largo del ciclo de conducción y como dicho valor aumenta conforme lo estipulan las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo.

Sien embargo, en la zona de desnivel del 6% (400s-600s) puede observarse como la velocidad de giro del motor en la configuración C no es capaz de cumplir la exigencias velocidad-tiempo del ciclo de conducción. Una circunstancia que, como se ha descrito y explicado a lo largo del capítulo, es consecuencia de la falta de potencia del motor.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Cuantificación de la influencia de las variables en la potencia suministrada:

Como en el apartado anterior, para concluir este análisis en la tabla 24 se muestra cuantitativamente la influencia de la masa del vehículo en potencia suministrada por el motor en aquellas zonas de máximo valor de la misma, las cuales se señalan en la siguiente figura 97:

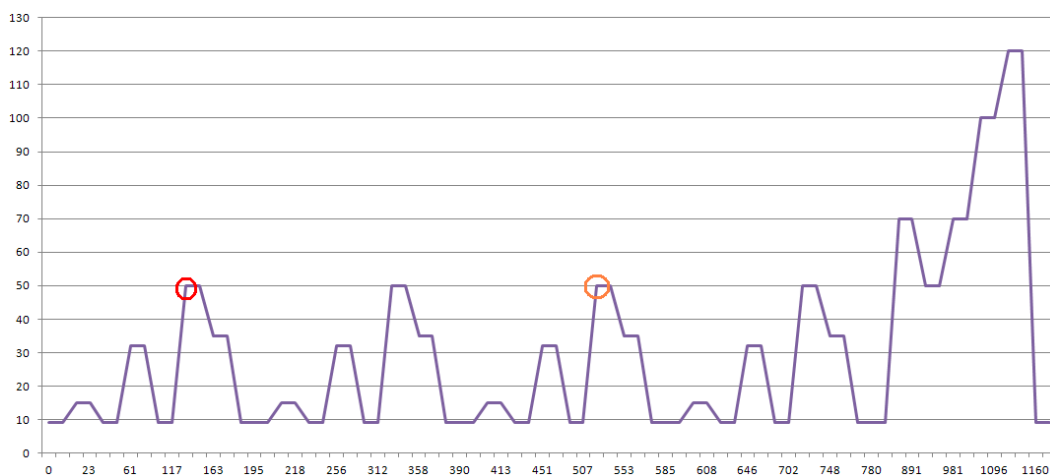


Figura 97. Zonas de estudio de máxima potencia en el ciclo de conducción para el trazado con pendiente.

En este caso únicamente se estudian las zonas de máxima potencia en la zona donde existen los tramos de pendiente ya que en el resto de zonas vistas en el apartado anterior los resultados son idénticos:

Trazado pendiente	Potencia (CV)	% incremento	Potencia (CV)	% incremento
Configuración A/C (+14%)	60.00	22.45	80.00	21.21
Configuración B	49.00	0.00	66.00	0.00
Desnivel	3.00%		6.00%	

Tabla 24. Incrementos de potencia en las zonas de máxima potencia del ciclo para el trazado con pendiente.

Los resultados que figuran en la tabla 24 permiten ver la influencia del desnivel en la potencia suministrada por el motor eléctrico para configuraciones de distinta masa.

En el caso de la pendiente del 6%, los valores de potencia suministrada corresponden únicamente a la configuración A dado que la configuración C es incapaz de cumplir las condiciones establecidas por el ciclo por falta de potencia.

6.2 Influencia del trazado para misma configuración peso-motor.

En este segundo apartado de resultados se va a analizar la influencia del trazado para una misma configuración peso-motor, es decir, se comparará el resultado de cada configuración (A, B, C) en el trazado llano frente al obtenido en el trazado con desnivel. Como ya se ha hecho en la segunda parte del apartado anterior, únicamente se muestran los resultados obtenidos en la zona urbana ya que no existe desnivel en el tramo extra-urbano por lo que los resultados de simulación son exactamente iguales en ambos casos. Así se evita cargar el epígrafe de información que no aporta conocimiento nuevo

❖ Configuración A

Estos son los resultados de la configuración A para cada tipo de trazado.

➤ Velocidad de desplazamiento:

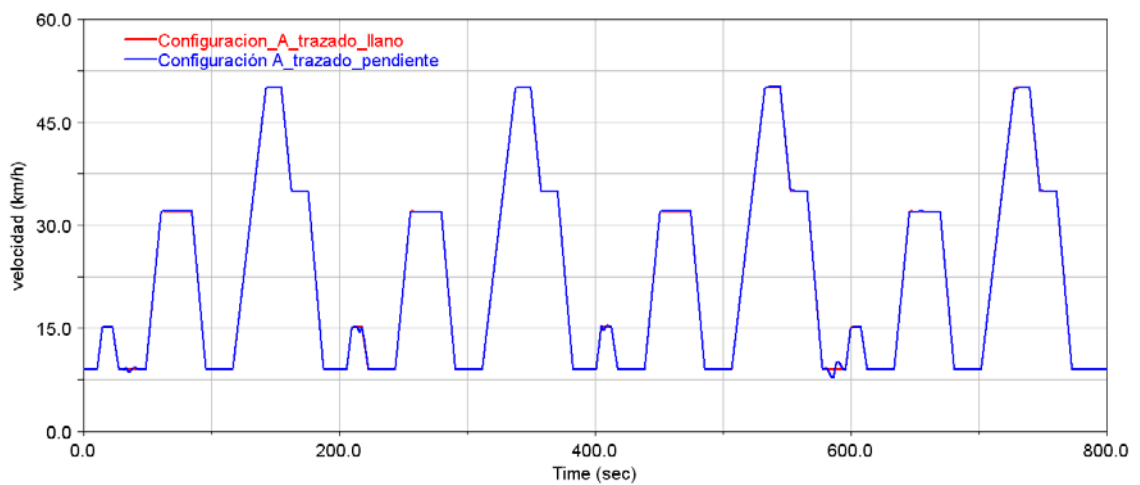


Figura 98. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.

La figura 98 permite observar como en el caso de la configuración A se cumple en ambos trazados las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo de conducción. Las líneas correspondientes a los dos trazados convergen a lo largo del ciclo.

A continuación, se muestra la gráfica de potencia suministrada por el motor eléctrico a lo largo del ciclo.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Potencia suministrada por el motor:

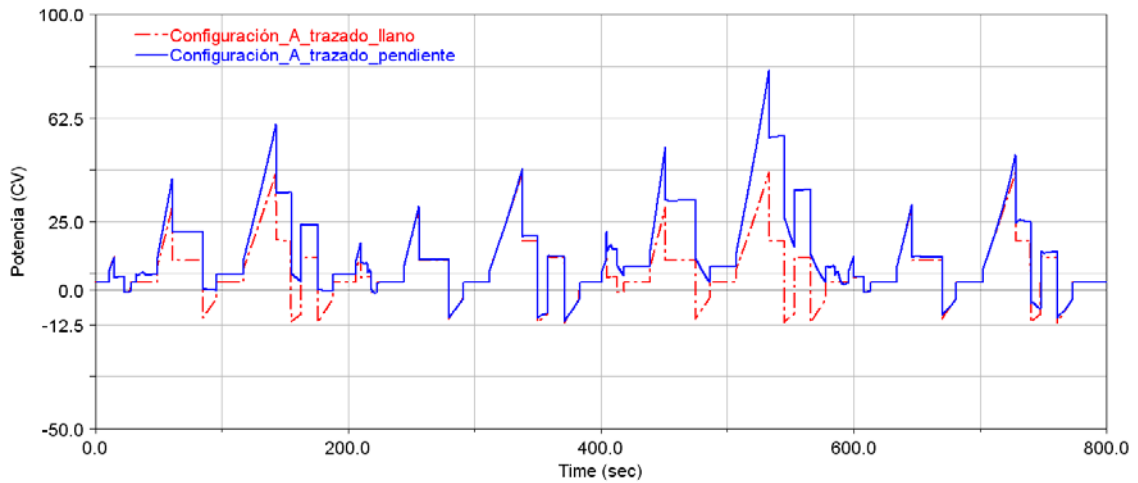


Figura 99. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 99, se puede ver como la potencia suministrada por el motor eléctrico es la misma en las zonas del trazado completamente llanas (200s-400s y 600s-800s) mientras en la zona de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) es mayor cuanto más acentuado es el desnivel.

➤ % de acelerador:

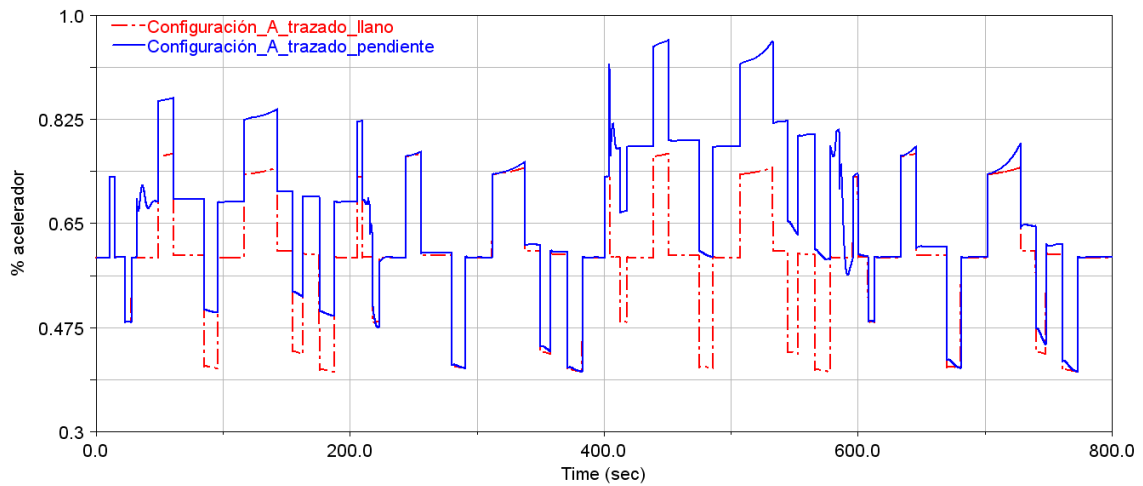


Figura 100. % de acelerador pisado para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.

En el resultado anterior se ha mostrado como el motor eléctrico debía suministrar una mayor potencia en las zonas de desnivel para poder cumplir las condiciones del ciclo de conducción. Para ello, el conductor debe aumentar el % de acelerador pisado. La figura 98, permite ver cuantitativamente ese aumento en las zonas de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) mientras en las zonas llanas coincidentes de ambos trazados

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

el valor de la variable es lógicamente el mismo. Además, puede observarse como durante la zona de ciclo urbano en la cual habitan los tramos de desnivel el valor del acelerador pisado nunca alcanza el 100% lo que significa que el vehículo tendría capacidad para superar un desnivel superior sin perder velocidad o recorrer el actual a una velocidad más alta. No cabe olvidar que en la configuración A, el motor eléctrico trabaja en sus máximas prestaciones como consecuencia de la conexión de todos los módulos de batería.

➤ Energía consumida:

El desnivel existente en un trazado es una variable muy importante a la hora de cuantificar el consumo energético de un vehículo. A continuación, se presentan los resultados de simulación obtenidos para la configuración A en ambos trazados:

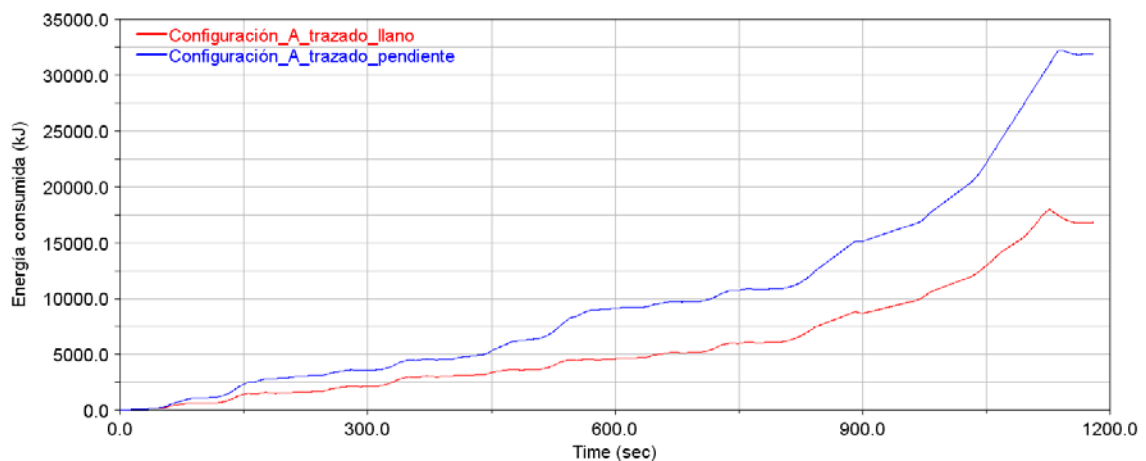


Figura 101. Energía consumida (kJ) por la configuración A en los dos trazados en el ciclo de conducción.

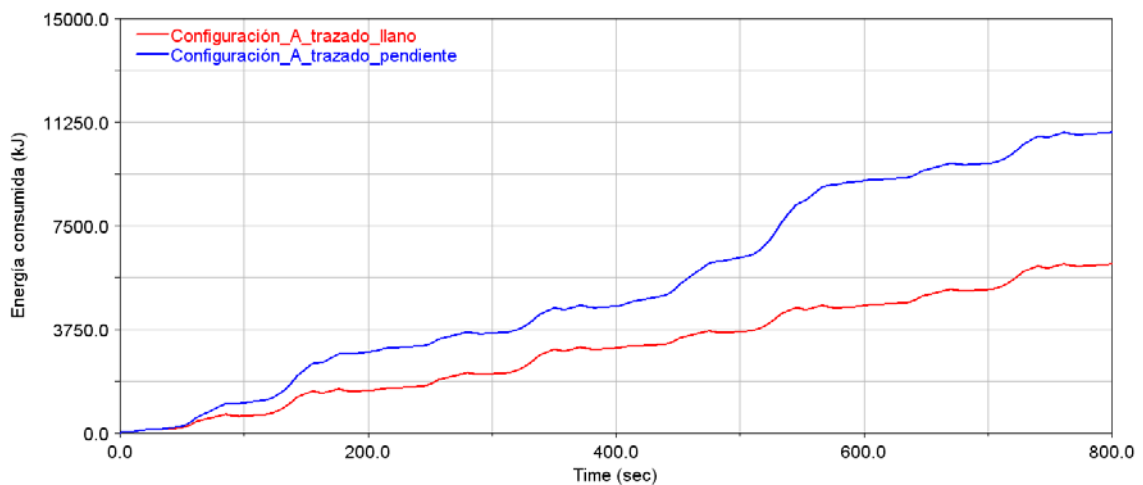


Figura 102. Energía consumida (kJ) por la configuración A en los dos trazados en la zona urbana.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Evidentemente, el consumo es mayor al recorrer el trazado con desnivel. Si se observa en detalle la figura 102, puede apreciarse como en las zonas de desnivel (0s-200s y 400s-600s) el consumo aumenta y se refleja en la distancia entre ambas líneas de la gráfica mientras en las zonas de trazado llano se mantienen en la misma distancia de separación.

➤ Par motor:

Véase a continuación, los resultados obtenidos en la simulación sobre el par-motor suministrado a lo largo del ciclo de conducción.

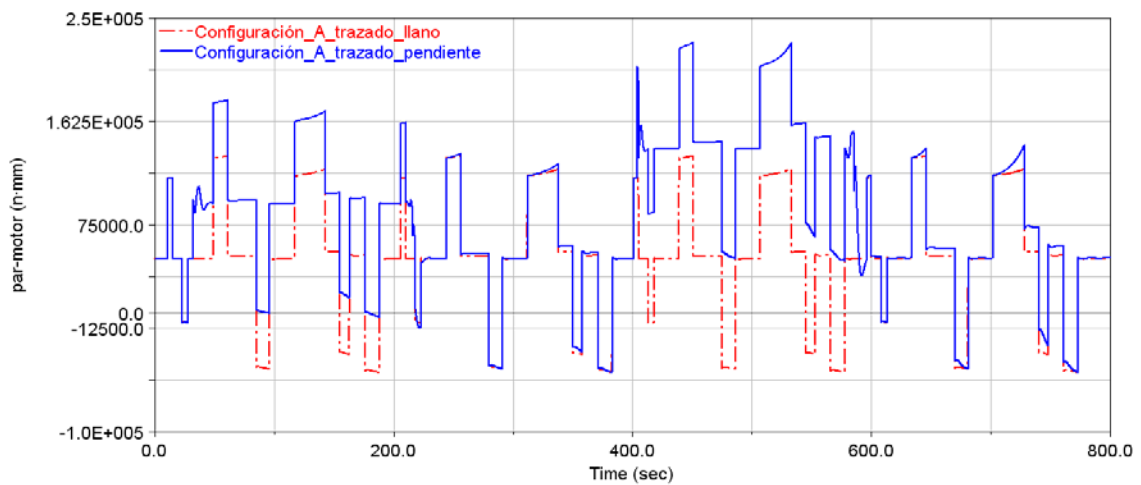


Figura 103. Par motor(N·mm) suministrado para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.

La figura 103 muestra como el motor eléctrico proporciona un valor de par mayor en las zonas de desnivel frente a los tramos llanos. Además, cuanto más grande es el desnivel mayor es el par entregado por el motor como puede verse en las zonas de pendiente del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s).

En las zonas de ambos trazados en las que coinciden las zonas llanas (200s-400s y 600s-800s), el par motor suministrado es el mismo por razones obvias.

Otro detalle que cabe señalar es que no se alcanza el valor máximo de par motor que es capaz de suministrar el motor eléctrico (250.000 N·mm) en la zona de desnivel del 6%. Esta información ayuda a entender porque no es necesario pisar el acelerador a fondo en esa zona.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Velocidad de giro del motor:

Como en los casos anteriores, la velocidad de giro del motor eléctrico es la última variable de estudio de la simulación:

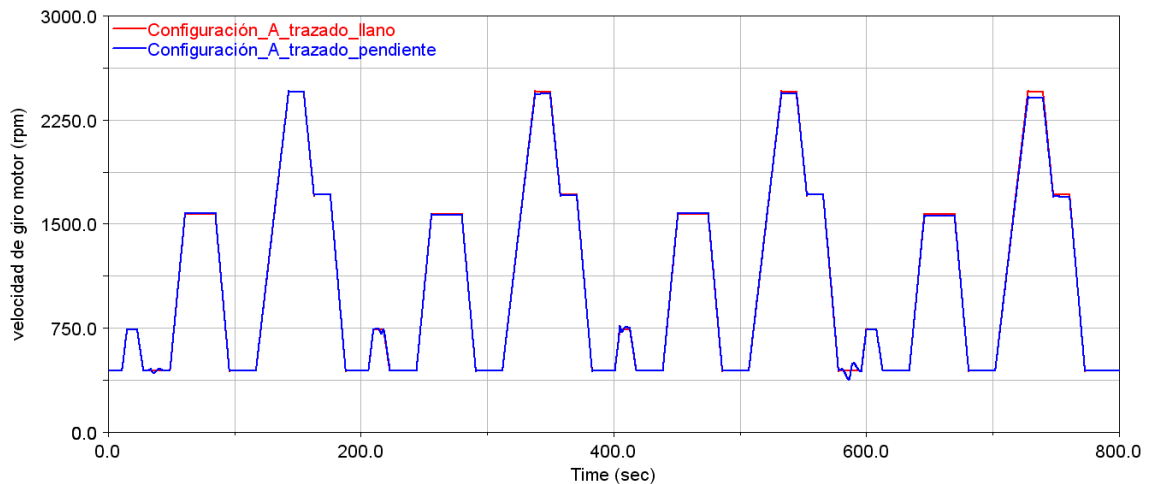


Figura 104. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración A en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 104, se muestra como la velocidad de giro del motor eléctrico de la configuración A en los dos trazados se encuentra en un rango de valor prácticamente igual a lo largo del ciclo de conducción y como dicho valor aumenta conforme lo estipulan las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo.

➤ Cuantificación de la influencia de las variables en la potencia suministrada:

Finalmente, en la tabla 25 se presenta cuantitativamente la influencia de la pendiente del trazado en la potencia suministrada por el motor en aquellas zonas de máximo valor de la misma, las cuales se marcan en la siguiente figura 105:

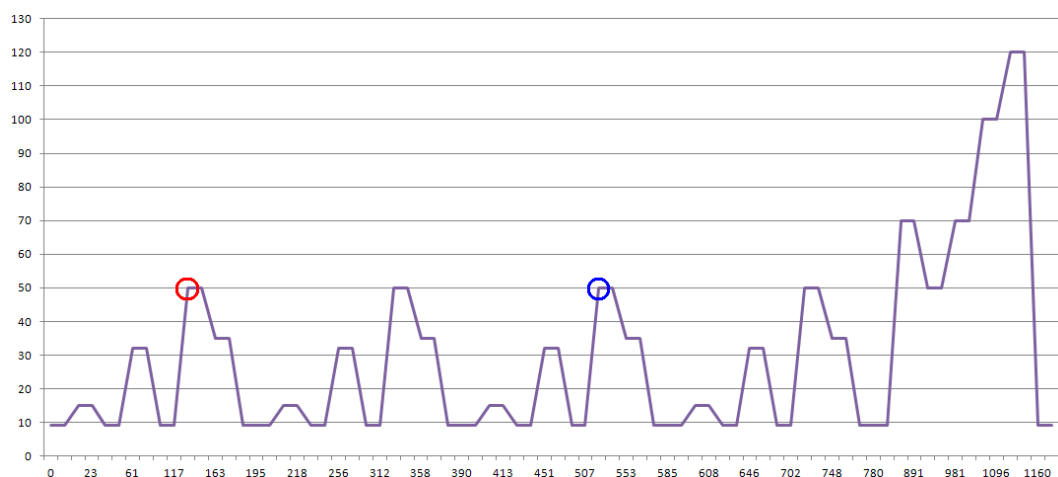


Figura 105. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración A.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Configuración A	Potencia (CV)	% incremento
Trazado llano	43.00	0.00
Trazado pendiente (3%)	60.00	39.53
Trazado pendiente (6%)	80.00	86.05

Tabla 25. Incrementos de potencia en la configuración A en zonas de trazado con desnivel.

Si se observa la tabla 25, puede apreciarse la gran influencia de la pendiente para la configuración A frente a la misma zona en el trazado llano y como esta aumenta conforme lo hace el desnivel llegando a valores de incremento porcentual de casi el 40% en la zona de pendiente del 3% y del 86% en el caso del tramo de pendiente con un 6% de desnivel.

❖ Configuración B

Estos son los resultados de la configuración B para cada tipo de trazado.

➤ Velocidad de desplazamiento:

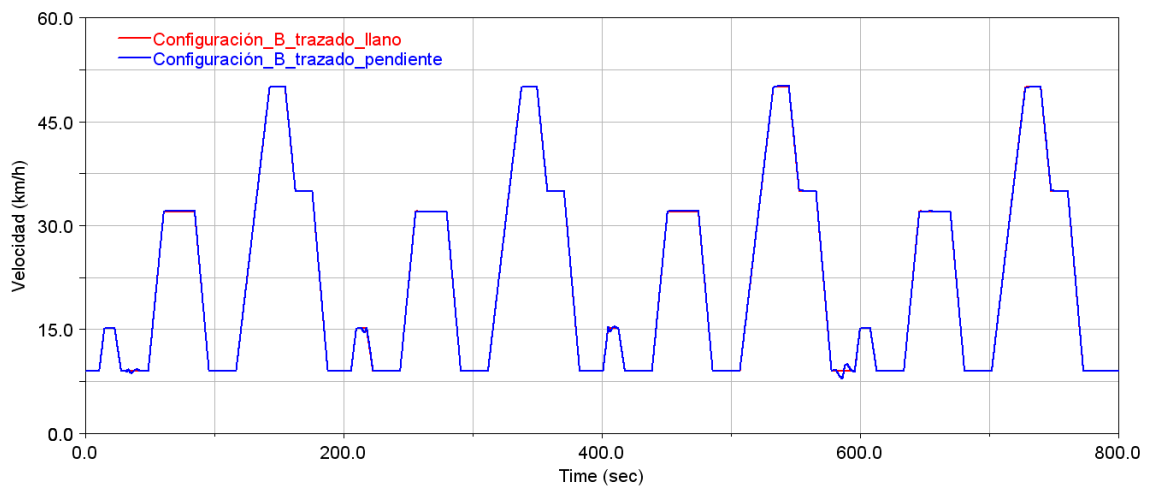


Figura 106. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 106, se puede observar como en el caso de la configuración B se cumple en ambos trazados las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo de conducción al mantener las líneas de representación una completa convergencia.

Véase a continuación, la gráfica de potencia suministrada por el motor eléctrico a lo largo del ciclo.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Potencia suministrada por el motor:

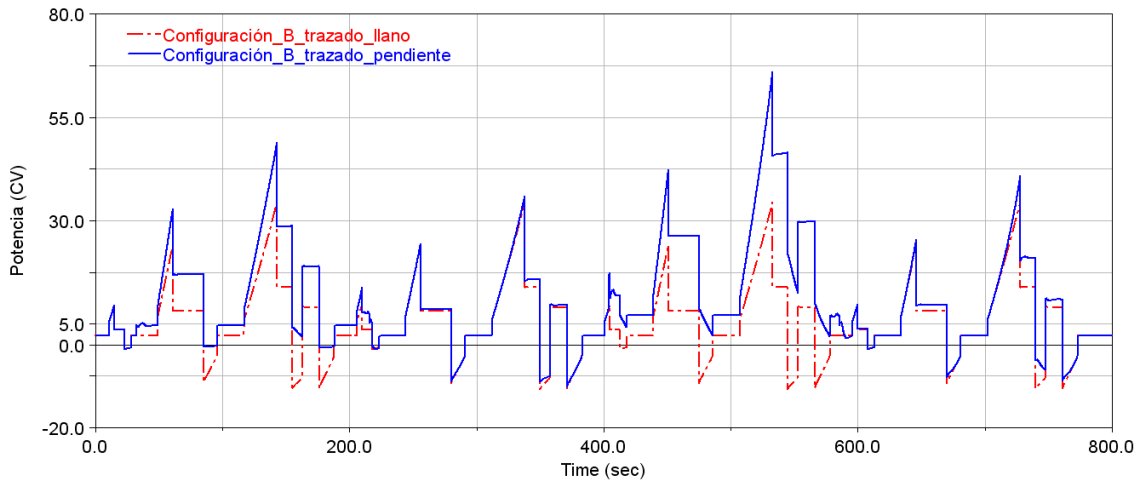


Figura 107. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.

El resultado obtenido en la figura 107 permite entender como la potencia suministrada por el motor eléctrico es la misma en las zonas del trazado completamente llanas (200s-400s y 600s-800s) mientras en la zona de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) es mayor cuanto más acentuado es dicho desnivel.

➤ % de acelerador:

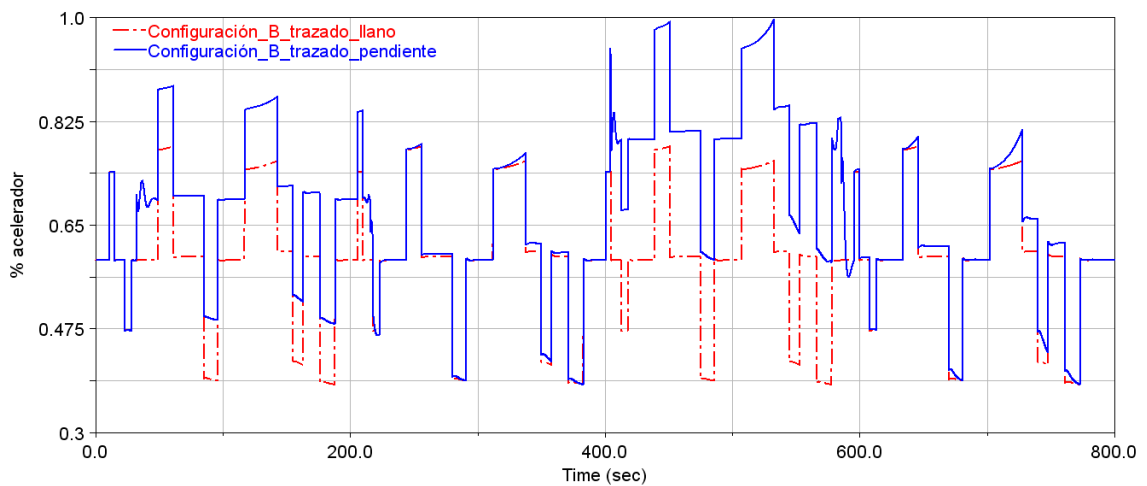


Figura 108. % de acelerador pisado para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.

Como se observa en el apartado de potencia suministrada, el motor eléctrico debe proporcionar un valor mayor de potencia en las zonas de desnivel para poder cumplir las condiciones del ciclo de conducción. Para ello, el conductor debe aumentar el % de acelerador pisado.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En la figura 108, se puede visualizar cuantitativamente ese aumento en las zonas de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) mientras en las zonas llanas coincidentes de ambos trazados el valor de la variable es lógicamente el mismo. Además, puede observarse como durante la zona de ciclo urbano en la cual habitan los tramos de un desnivel del 6% (400s-600s), el valor del acelerador pisado alcanza valores muy cercanos al 100% lo que significa que el vehículo no sería capaz de superar un desnivel superior sin perder velocidad o recorrer el actual a una velocidad más alta. Cabe recordar que en la configuración B, la disminución de masa de baterías cargada supone un descenso en las prestaciones que proporciona el motor eléctrico.

➤ Energía consumida:

Como se ha comentado en el apartado anterior correspondiente a la configuración A, el desnivel existente en un trazado es una variable muy importante a la hora de cuantificar el consumo energético de un vehículo. Estos son los resultados de simulación obtenidos para la configuración B en ambos trazados:

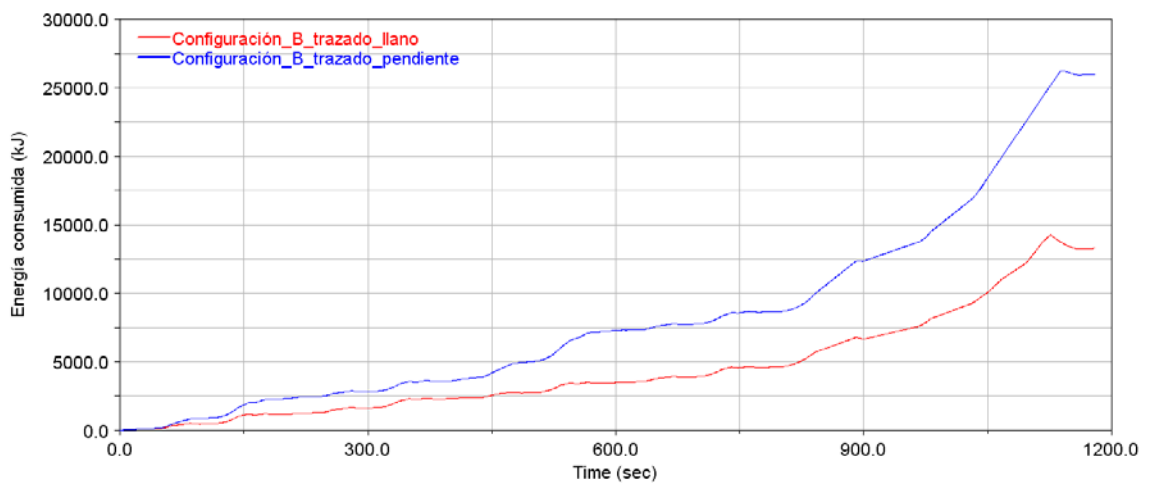


Figura 109. Energía consumida (kJ) por la configuración B en los dos trazados en el ciclo de conducción.

Siguiendo la coherencia de resultados, el consumo es mayor al recorrer el trazado con desnivel.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

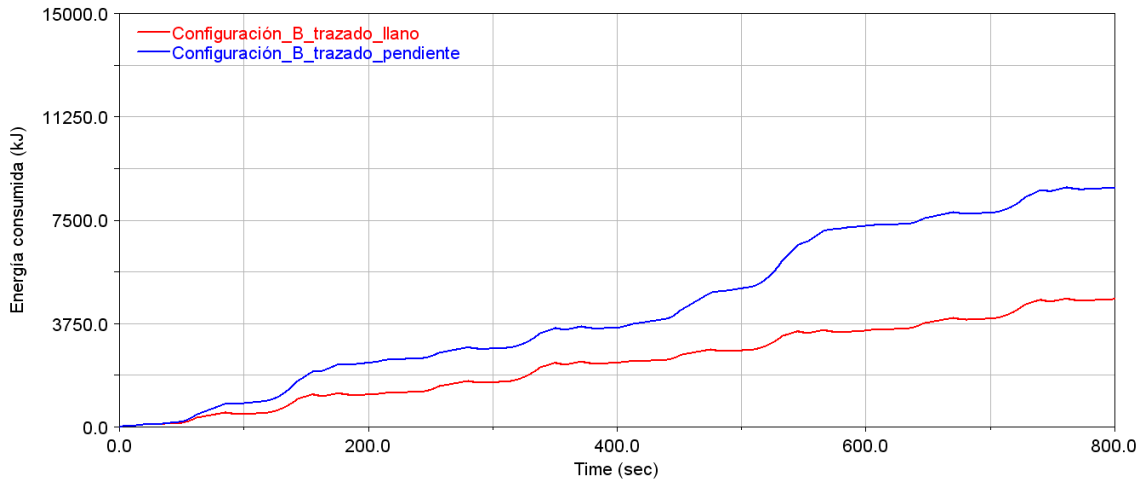


Figura 110. Energía consumida (kJ) por la configuración B en los dos trazados en la zona urbana.

En la figura 110 se muestra en detalle la zona urbana del ciclo, en ella puede apreciarse como en las zonas de desnivel (0s-200s y 400s-600s) el consumo aumenta y se refleja en la distancia entre ambas líneas de la gráfica mientras en las zonas de trazado llano se mantienen en la misma distancia de separación.

➤ Par motor:

Estos son los resultados obtenidos en la simulación sobre el par-motor suministrado a lo largo del ciclo de conducción:

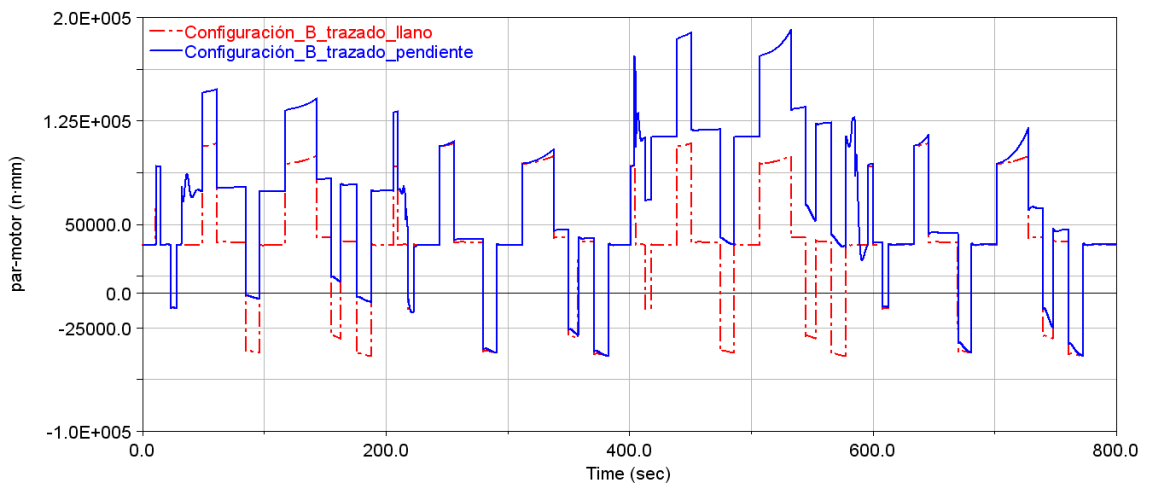


Figura 111. Par motor(N·mm) suministrado para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 111 se muestra como el motor eléctrico proporciona un valor de par mayor en las zonas de desnivel frente a los tramos llanos. Además, cuanto más grande es el desnivel mayor es el par entregado por el motor como puede verse en las zonas de pendiente del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s).

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En los tramos de ambos trazados en las que coinciden las zonas llanas (200s-400s y 600s-800s), el par motor suministrado es el mismo por razones obvias.

➤ Velocidad de giro del motor:

La velocidad de giro del motor eléctrico es la última variable de estudio de la simulación.

Estos son los resultados obtenidos:

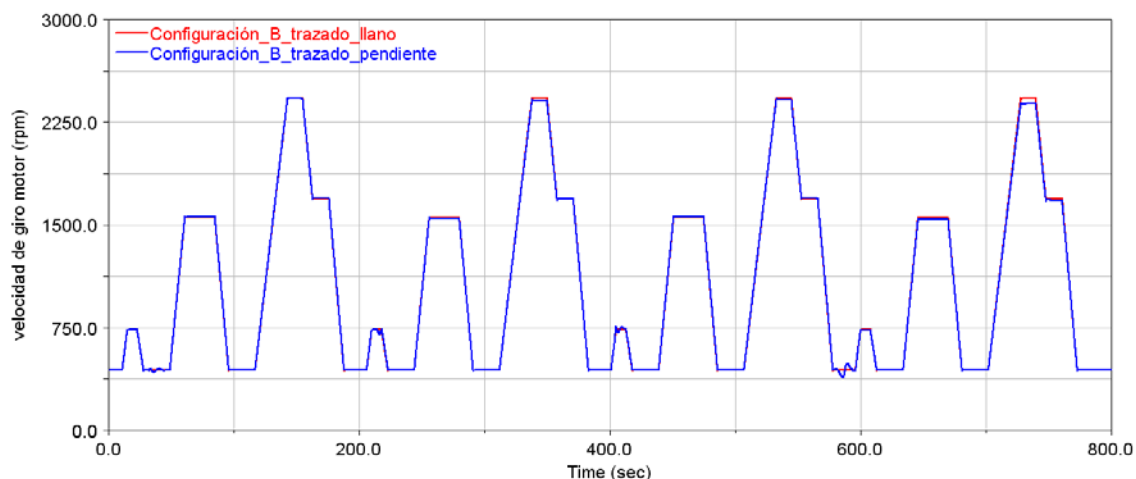


Figura 112. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración B en los dos trazados en zona urbana.

La figura 112 permite observar como la velocidad de giro del motor eléctrico de la configuración B se encuentra en ambos trazados en un rango de valor prácticamente igual a lo largo del ciclo de conducción y como dicho valor aumenta conforme lo estipulan las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo.

➤ Cuantificación de la influencia de las variables en la potencia suministrada:

En la figura 113, se marcan las zonas de estudio de la influencia del desnivel en el aumento de potencia suministrada por el motor:

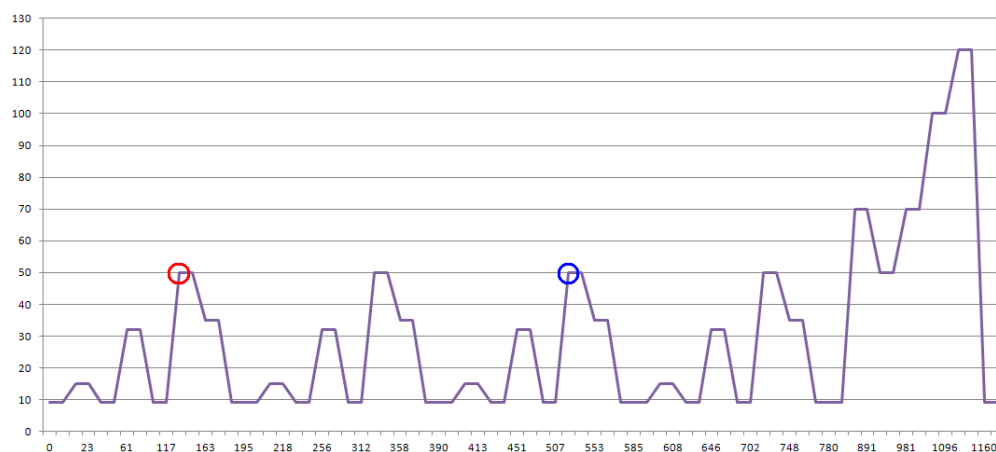


Figura 113. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración B.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Configuración B	Potencia (CV)	% incremento
Trazado llano	34.00	0.00
Trazado pendiente (3%)	49.00	44.12
Trazado pendiente (6%)	66.00	94.12

Tabla 26. Incrementos de potencia en la configuración B en zonas de trazado con desnivel.

La tabla 26 permite ver la influencia de la pendiente para la configuración B frente a la misma zona en el trazado llano y como esta aumenta conforme lo hace el desnivel llegando a valores de incremento porcentual del 44% para la zona de pendiente del 3% y del 94% en el caso de la pendiente con un 6% de desnivel.

❖ Configuración C

Los resultados de simulación obtenidos para la configuración C en cada tipo de trazado son los siguientes:

➤ Velocidad de desplazamiento:

En primer lugar, se presenta el valor de la velocidad de desplazamiento del vehículo a lo largo del ciclo de simulación.

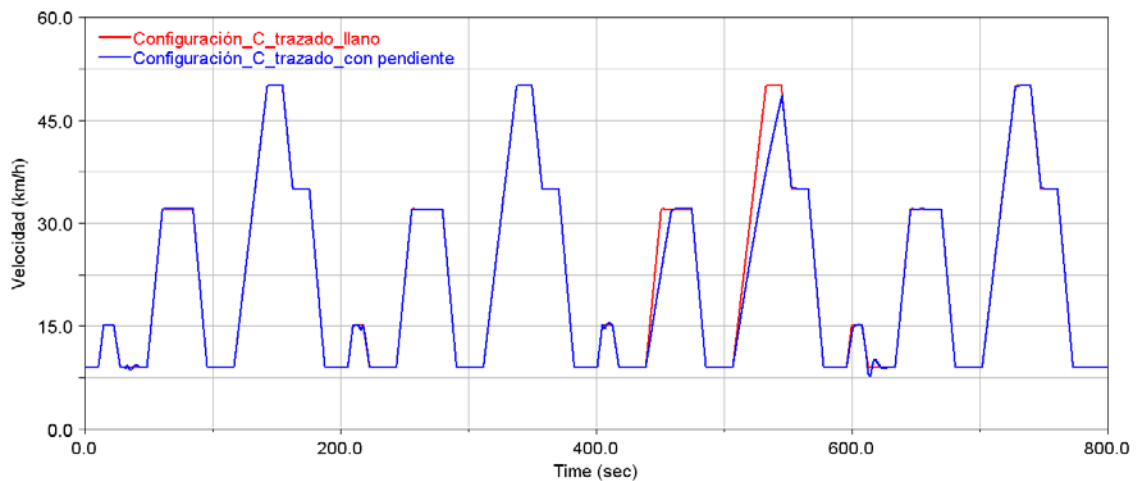


Figura 114. Velocidad de desplazamiento (km/h) para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 114, se puede observar como en el caso de la configuración C no se cumple en el trazado con pendiente con las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo de conducción. En el tramo de desnivel del 6% (400s-600s), el vehículo no es capaz de conseguir la velocidad establecida en el instante dado. En cambio, si lo consigue en el tramo de desnivel del 3% (0s-200s).

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

➤ Potencia suministrada por el motor:

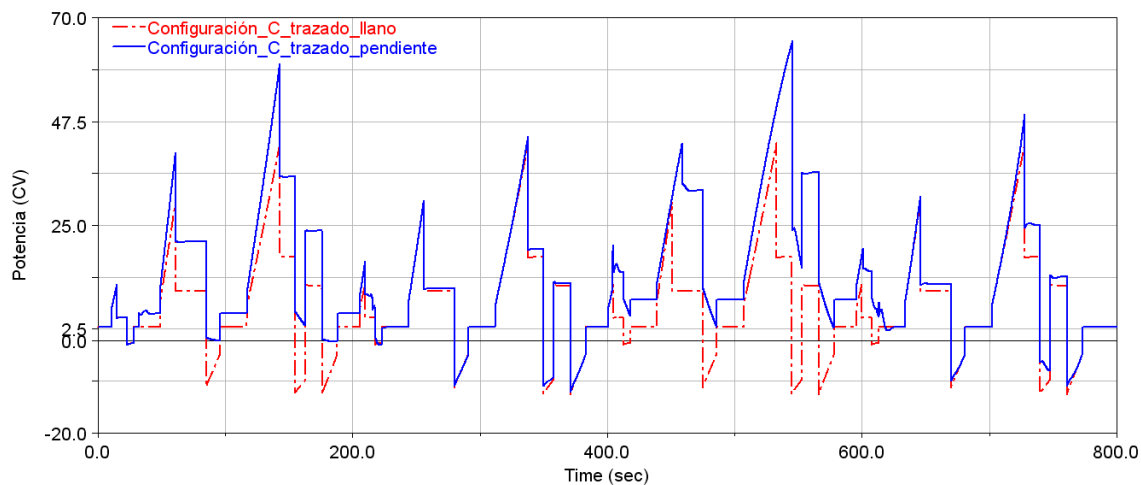


Figura 115. Potencia suministrada por el motor (CV) para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.

Como en los casos de simulación vistos de las anteriores configuraciones (A, B), el resultado obtenido en la figura 115 permite entender como la potencia suministrada por el motor eléctrico es la misma en las zonas del trazado completamente llanas (200s-400s y 600s-800s) mientras en la zona de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) es mayor cuanto más acentuado es dicho desnivel.

Sin embargo, del incumplimiento de las condiciones de velocidad-tiempo vistas en el anterior resultado, se puede deducir que la potencia que suministra en motor eléctrico en la zona de pendiente del 6% (400s-600s) no alcanza a la que se requiere en dicha situación.

➤ % de acelerador:

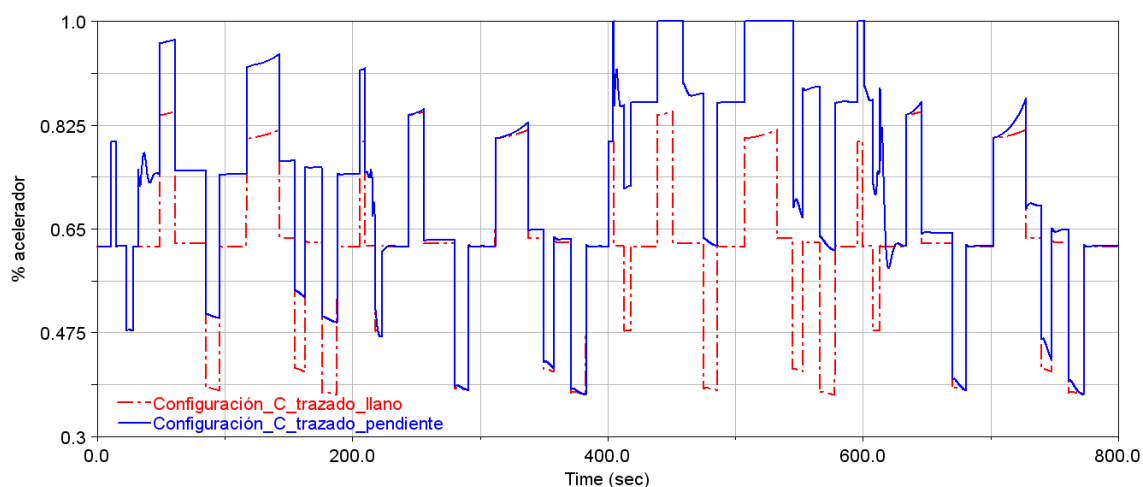


Figura 116. % de acelerador pisado para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El resultado anterior informa de como el motor eléctrico debe suministrar una mayor potencia en las zonas de desnivel para poder cumplir las condiciones del ciclo de conducción. Para ello, el conductor debe aumentar el % de acelerador pisado.

En la figura 116, se puede ver cuantitativamente ese aumento en las zonas de desnivel del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s) mientras en las zonas llanas coincidentes de ambos trazados el valor de la variable es el mismo. Sin embargo, como se ha visto anteriormente, en la zona de desnivel del 6% (400s-600s) no se cumplen las condiciones de velocidad-tiempo establecidas por el ciclo de conducción pese a alcanzar el 100% de acelerador pisado. Este hecho permite confirmar la deducción evidente de que el motor eléctrico sufre una deficiencia de potencia como consecuencia de su configuración peso-mapa motor que no le permite cumplir con las exigencias de velocidad-tiempo que exige el ciclo de conducción en el trazado con desnivel.

Por su parte, el vehículo si es capaz de superar el primer tramo de desnivel del 3% (0s-200s) sin alcanzar el 100% de acelerador lo cual indica que la pendiente superable por el coche en configuración C para las condiciones de ciclo establecidas es mayor que el 3% pero menor que el 6%.

➤ Energía consumida:

Como se ha estado comentado en los apartados anteriores correspondientes a las configuraciones A y B, el desnivel existente en un trazado es una variable muy importante a la hora de cuantificar el consumo energético de un vehículo. Véase a continuación, los resultados de simulación obtenidos para la configuración C en ambos trazados:

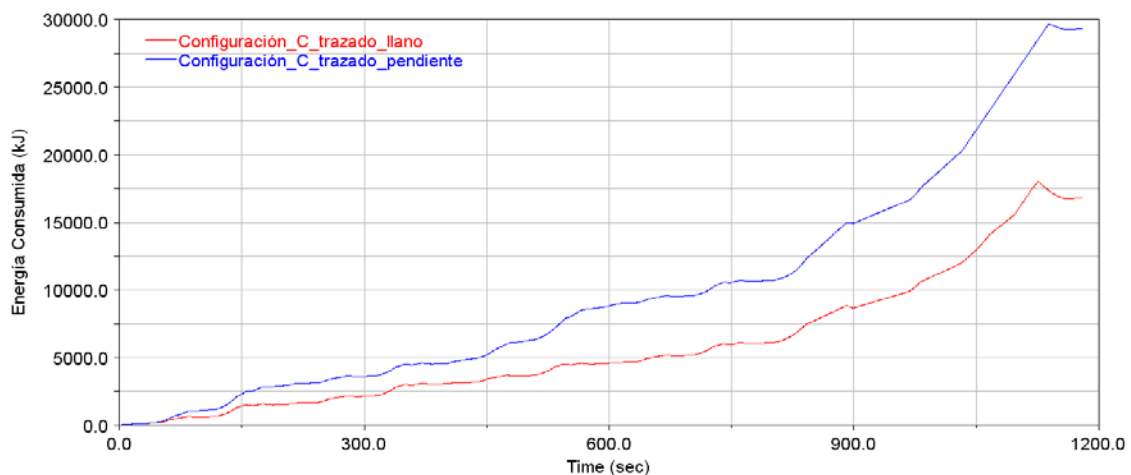


Figura 117. Energía consumida (kJ) por la configuración C en los dos trazados en el ciclo de conducción.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

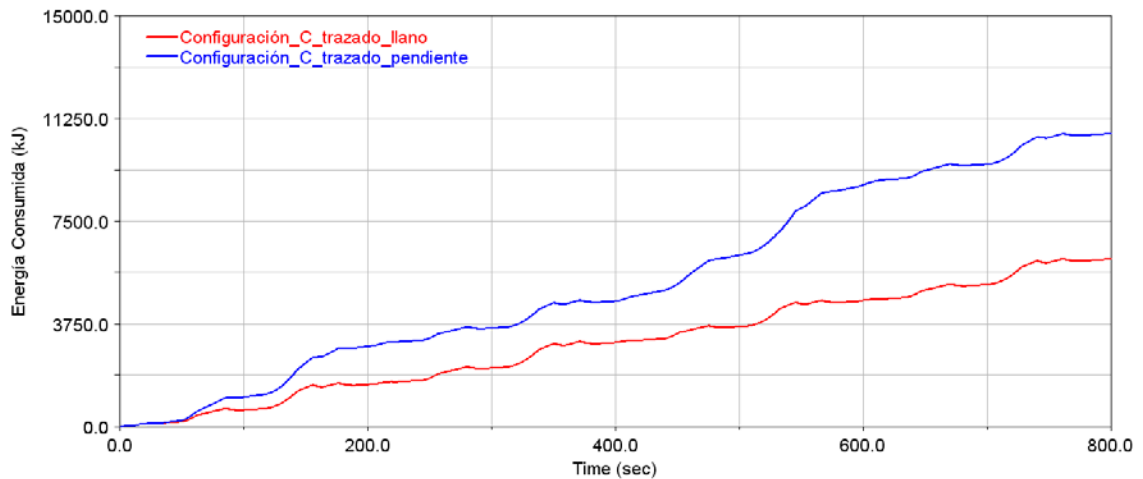


Figura 118. Energía consumida (kJ) por la configuración C en los dos trazados en la zona urbana.

Lógicamente, el consumo es mayor al recorrer el trazado con desnivel. Si se observa en detalle la figura 118, puede apreciarse como en las zonas de desnivel (0s-200s y 400s-600s) el consumo aumenta y se refleja en la distancia entre ambas líneas de la gráfica, pese al déficit de potencia que sufre la configuración C para el trazado con desnivel, mientras en las zonas de trazado llano se mantienen en la misma distancia de separación

➤ Par motor:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación sobre el par-motor suministrado a lo largo del ciclo de conducción.

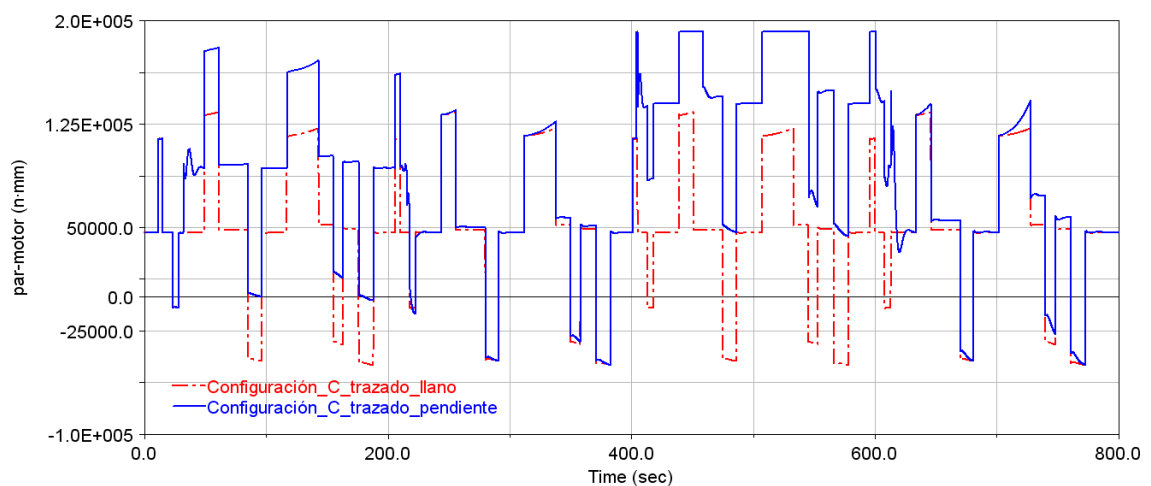


Figura 119. Par motor (N-mm) suministrado para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.

La figura 119 muestra como el motor eléctrico proporciona un valor de par mayor en las zonas de desnivel frente a los tramos llanos. Además, cuanto más elevado es el desnivel

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

mayor es el par entregado por el motor como puede verse en las zonas de pendiente del 3% (0s-200s) y del 6% (400s-600s).

En las zonas de ambos trazados en las que coinciden las zonas llanas (200s-400s y 600s-800s), el par motor suministrado es el mismo por razones obvias.

Otro detalle que cabe señalar es que se alcanza el valor máximo de par motor que es capaz de suministrar el motor eléctrico, en la presente configuración peso-mapa motor, en la zona de desnivel del 6%. Esta información ayuda a entender con mayor claridad porque el vehículo no es capaz de cumplir con las exigencias de velocidad-tiempo establecidas por el ciclo de conducción.

➤ Velocidad de giro del motor:

Como en los casos anteriores, la velocidad de giro del motor eléctrico es la última variable de estudio de la simulación:

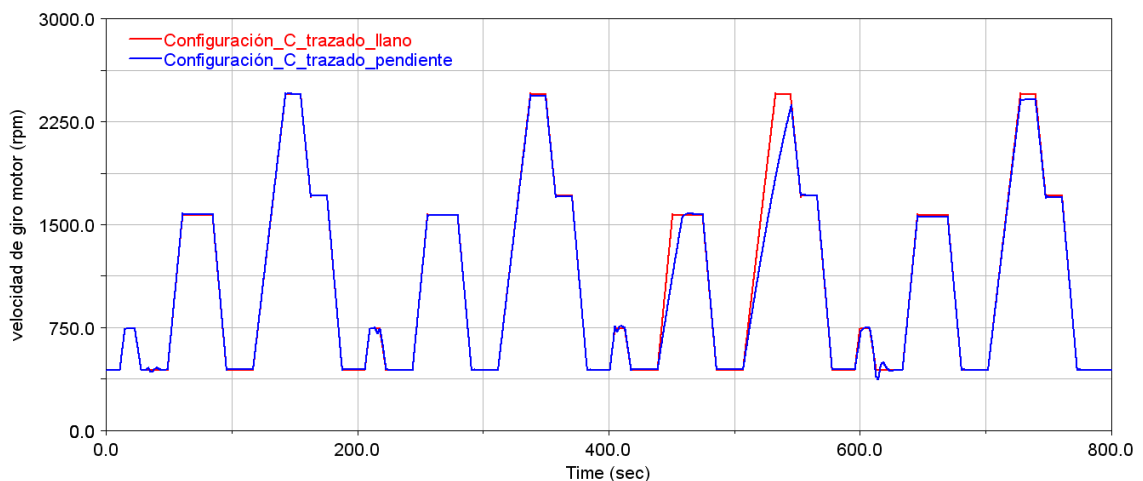


Figura 120. Velocidad de giro (rpm) del motor para la configuración C en los dos trazados en zona urbana.

En la figura 120, se muestra como la velocidad de giro del motor eléctrico de la configuración A en los dos trazados se encuentra en un rango de valor prácticamente igual a lo largo del ciclo de conducción, excepto en la zona de desnivel del 6% (400s-600s), y como dicho valor aumenta conforme lo estipulan las condiciones de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo.

Como ya se ha ido describiendo a lo largo del apartado, en el tramo de desnivel del 6% (400s-600s) el vehículo no cumple con las exigencias de velocidad-tiempo impuestas por el ciclo de conducción como consecuencia de un déficit de potencia. Este hecho se

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

refleja en el figura X, donde puede observarse la divergencia entre velocidad de giro del motor entre ambos trazados en la zona de mayor desnivel.

Con este resultado de simulación se pone fin al capítulo dedicado al análisis de resultados. El siguiente capítulo se dedicará las conclusiones que se extraen de los resultados de simulación, las posibles aplicaciones del vehículo y las posibilidades de continuación del trabajo realizado.

➤ Cuantificación de la influencia de las variables en la potencia suministrada:

Finalmente, se presenta el incremento % que supone para la potencia suministrada en la configuración C del vehículo, la aparición de pendientes en el trazado respecto al propio tramo llano. En la figura 121, se señalan aquellas zonas de estudio que corresponden con instantes del ciclo de conducción de máxima potencia suministrada:

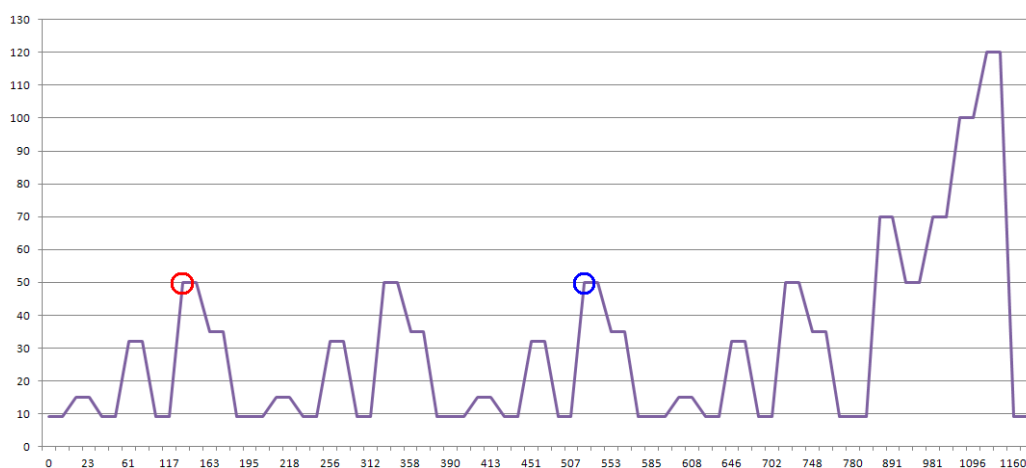


Figura 121. Zonas de estudio de máxima potencia para el trazado con pendiente en la configuración C.

Configuración C	Potencia (CV)	% incremento
Trazado llano	43.00	0.00
Trazado pendiente (3%)	60.00	39.53
Trazado pendiente (6%)	51.00	18.60

Tabla 27. Incrementos de potencia en la configuración C en zonas de trazado con desnivel.

En la tabla 27, puede apreciarse la influencia de la pendiente para la configuración C frente a la misma zona en el trazado llano. En el tramo de desnivel del 3%, el aumento de potencia suministrada es de casi un 40% como en el caso de la Configuración A dado la igualdad de masa total entre ellas. En el caso de la pendiente del 6%, el valor de potencia no es significativo ya que el vehículo en configuración C es incapaz de cumplir las exigencias del ciclo de conducción en esa zona.

7. Conclusiones finales y posibilidades de continuación.

En el capítulo final, se van a desarrollar las conclusiones obtenidas respecto a la viabilidad del uso del Zytel Zero como vehículo de distribución urbana de mercancías (DUM) tras la información obtenida acerca las variables de mayor influencia en el consumo energético así como las posibilidades de continuación del proyecto Zytel Zero.

7.1 Conclusiones finales del análisis de simulación.

Tras llevar a cabo las simulaciones del vehículo en las distintas configuraciones de peso-mapa motor y en los distintos trazados con y sin desnivel queda claro que tanto la masa total del vehículo como el desnivel del trazado tienen una influencia decisiva en el comportamiento del vehículo derivando en un aumento del consumo energético.

Para las condiciones establecidas por el ciclo de conducción empleado en la simulación se ha visto como una pendiente de un desnivel del 3% puede suponer un aumento de alrededor del 40% de la potencia que debe suministrar el motor en las mismas condiciones en un trazado llano. En el caso de una pendiente de desnivel del 6% el aumento de potencia que debe ser suministrada puede rondar un 90%.

Por su parte, una variación del 15% en la masa total del vehículo fruto de la extracción o carga de módulos de batería supone un descenso / aumento de alrededor del 20% en el valor de potencia que debe suministrar el motor eléctrico.

Además, en función de si las variables pueden ser controladas por el usuario del vehículo podrían clasificarse en:

- ✓ **Variables externas:** Incluyen el ciclo de conducción que va a realizar el vehículo y el posible desnivel del trazado que se recorre.
- ✓ **Variables internas:** Incluyen la masa de baterías cargada y el número de módulos conectados.

En los vehículos eléctricos es fundamental conocer de antemano el ciclo de conducción que van a realizar durante su funcionamiento ya que proporciona información de gran valía (velocidades de desplazamiento, aceleraciones, períodos de parada, duración de ciclo, etc) respecto a la estimación del consumo energético al que se va a enfrentar el vehículo.

7. CONCLUSIONES FINALES Y POSIBILIDADES DE CONTINUACIÓN

En los análisis realizados mediante simulación a lo largo del trabajo no se ha tenido en cuenta la masa de mercancías a la que debe hacer frente el vehículo, es decir se ha simulado como si fuese vacío. Esta decisión se basa en el hecho de que se buscaba conocer el comportamiento del vehículo en su versión más sencilla en las diferentes configuraciones posibles para descartar aquellas configuración, si las hubieses, que no fuesen capaces de cumplir con las exigencias del ciclo de conducción en vacío o en el caso de que todas fuesen incapaces de ello, descartar al vehículo para uso en distribución urbana de mercancías (DUM) para el ciclo de conducción propuesto.

A partir de los resultados obtenidos puede deducirse para cada configuración que:

- **Configuración A:**

Sería la configuración en la cual el vehículo sería capaz de soportar una mayor carga de mercancías para el ciclo dado y ambos trazados dados los resultados vistos en las gráficas de potencia suministrada y % de acelerador.

- **Configuración B:**

En este caso, el vehículo soportaría una carga de masa de mercancías menor que en el caso A de acuerdo a los resultados vistos de potencia suministrada y % de acelerador.

- **Configuración C:**

Vistos los resultados de simulación respecto a la potencia suministrada y al % de acelerador, se pone de manifiesto que en vehículo sería incapaz de llevar carga adicional de mercancías y cumplir el ciclo de conducción ya que no lo es en condiciones de vacío.

De este modo, la simulación en vacío nos permite realizar una primera selección de configuraciones validas para la distribución urbana de mercancías (DUM) para el ciclo de conducción dado en el trazado dado. Ahora, a partir de los datos de la masa de carga que debe distribuirse debería realizarse un segundo análisis de simulación para comprobar que el vehículo en su configuración cumple de una manera más óptima las condiciones que exige el ciclo de conducción.

A partir de esta información, se basará la decisión de cómo configurar el vehículo en cuanto a masa de baterías cargadas y conectadas para conseguir una optimización entre la energía disponible y la que se va a consumir, es decir, evitar tanto que el vehículo no

sea capaz de cumplir las condiciones velocidad-tiempo del ciclo o de no tener la autonomía suficiente, como que se esté circulando con una energía sobrante respecto a la de consumo que penaliza al vehículo con su consiguiente masa de batería cargadas.

Herramientas de simulación como Adams/Car permiten conocer el comportamiento energético del vehículo ante estas variables de influencia y trazar límites entre configuraciones óptimas y configuraciones no óptimas para un ciclo de conducción dado y un trazado de desnivel existente.

Como conclusión final del TFM, se establece la validez del vehículo Zytel Zero para su uso en distribución urbana de mercancías (DUM) dado que de los análisis de simulación muestran como es capaz de recorrer el ciclo NEDC en al menos dos de sus configuraciones con capacidad para albergar carga sin incumplir el ciclo de conducción.

7.2 Posibilidades de continuación del proyecto.

Para cerrar este capítulo, en el presente apartado se van a recoger una serie de propuestas sobre las posibilidades de continuación que existen del proyecto Zytel Zero respecto a la simulación mediante software:

- ✓ Realización de un análisis de simulación con Adams/Car enfocado al comportamiento dinámico de los distintos subsistemas (ruedas, frenos, suspensiones, etc) en un trazado modelado a partir de un recorrido real.
- ✓ Comparación de los resultados obtenidos en simulaciones numéricas mediante Adams/Car frente al comportamiento real del vehículo. Grado de correlación y posibilidades de mejora en el modelado.
- ✓ Desarrollo de una aplicación que permita a partir de la información de las gráficas de consumo energético obtenidas en Adams/Car calcular la autonomía de vehículo de manera rápida y eficaz.

8. Bibliografía.

A continuación, se resume la bibliografía empleada en la elaboración del presente TFM:

- [1] Aparicio Izquierdo, F., Vera Álvarez, C. y Díaz López, V. 2001. *Teoría de los vehículos automóviles*. Madrid: Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2001. ISBN: 8474841461.
- [2] Brant, Bob. 1993. *Build your own electric vehicle*. EE.UU: TAB Books (McGraw-Hill), 1993. ISBN: 0830642315.
- [3] Cascajosa, Manuel. 2000. *Ingeniería de vehículos: sistemas y cálculos*. Madrid: Tébar, 2000. ISBN: 8495447061.
- [4] Crompton, T.R. 2000. *Battery reference book*. Oxford: Newnes, 2000. ISBN: 075064625.
- [5] Dassault Systèmes. 2009. *Ayuda de SolidWorks 2009*. [Documento] Velizy-Villacoublay (Francia): Dassault Systèmes, 2009.
- [6] King, Alexander C. 2003. *Uninterruptible power supplies and standby power systems*. Nueva York: McGraw-Hill, 2003. ISBN: 0071395954.
- [7] Luque, Pablo, Álvarez, Daniel y Vera, Carlos. 2004. *Ingeniería del Automóvil: Sistemas y Comportamiento Dinámico*. Madrid: Thomson, 2004. ISBN: 8497322835.
- [8] MSC.Software. 2008. *Adams 2008 r1 Online Help*. [Documento] Santa Ana (California, EE.UU.): MSC.Software, 2008.
- [9] Trinidad López, Francisco. 1997. *El Vehículo Eléctrico: tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro*. Madrid: McGraw-Hill, 1997. ISBN: 8448112016.
- [10] Juan Alberto Liarte. PFC: *Simulación de vehículo eléctrico para la optimización de su comportamiento*. Universidad de Zaragoza, 2010.
- [11] Iván Lozano Domínguez. PFC: *Transformación de un vehículo propulsado por un MACI en un vehículo eléctrico de altas prestaciones*. Universidad de Zaragoza, 2011.

